



# 宇宙の広さを測る挑戦と天の川銀河探究

副題: 宇宙の距離はしごを支える位置天文観測、そしてJASMINEへ

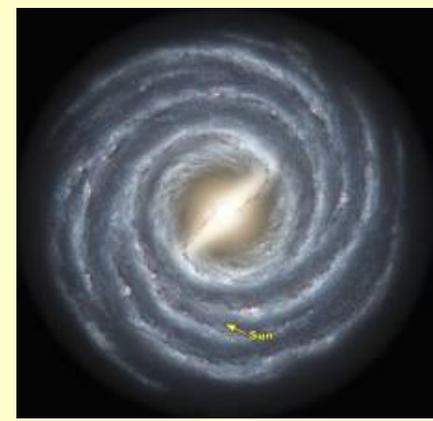
郷田直輝 (国立天文台JASMINEプロジェクト)



Credit:NASA



# 今日のお話し



## 1. はじめに

宇宙はどれぐらい広いの？ 宇宙の階層構造

## 2. どうやって宇宙の“広さ”が分かってきたの？

宇宙の距離はしご！！

## 3. 宇宙の距離はしごの“土台”：位置天文観測とは？

位置天文観測とその意義、歴史、現状

## 4. 赤外線位置天文観測衛星JASMINEによる

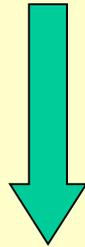
天の川銀河探究

## 5. おわりに

# 1.はじめに

★宇宙はどれぐらい広いの？

宇宙は広大、豊か



**宇宙の階層構造** (かいそうこうぞう)

# 星は遠い！！！！

## 天文学での距離スケール

光は秒速約 30万 km

→ \* 1秒間に地球を約7周半 (地球の直径 : 約1万3000km)

\* 月まで1秒ちょっとで到着 (月までの距離: 約38万km)

\* 太陽まで約8分で到着 (太陽までの距離: 約1億 5000万km)

→ 今、見ている太陽は、約8分前の太陽の姿！！

天文学では、光が1年間に進む距離が距離の単位(たんい)の1つとなる

ただし、研究者は、パーセク(pc)という単位をよく用いる。

1光年(こうねん) = 約 $9.5 \times 10^{12}$ km  
(9兆5000億km)

\* 例: 北極星は約430光年

→ 約430年前の北極星を見ている！！

# 宇宙の階層構造

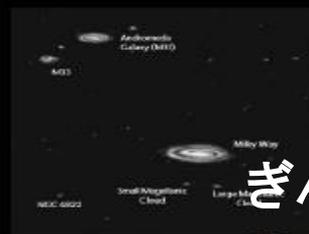
だいこうぞう

宇宙の大構造

ぎんがぐん  
銀河群

わいしょう ぎんが  
矮小銀河

たいようけい  
太陽系



ぎんがだん  
銀河団

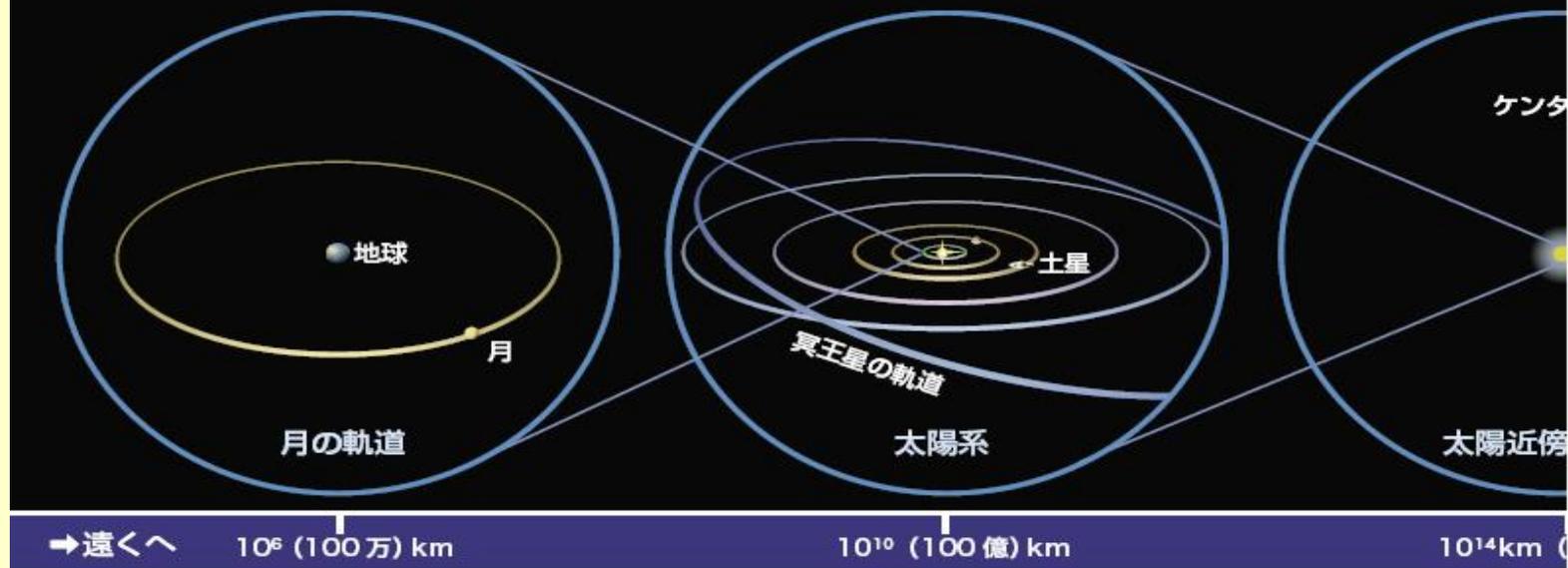


星団 せいだん

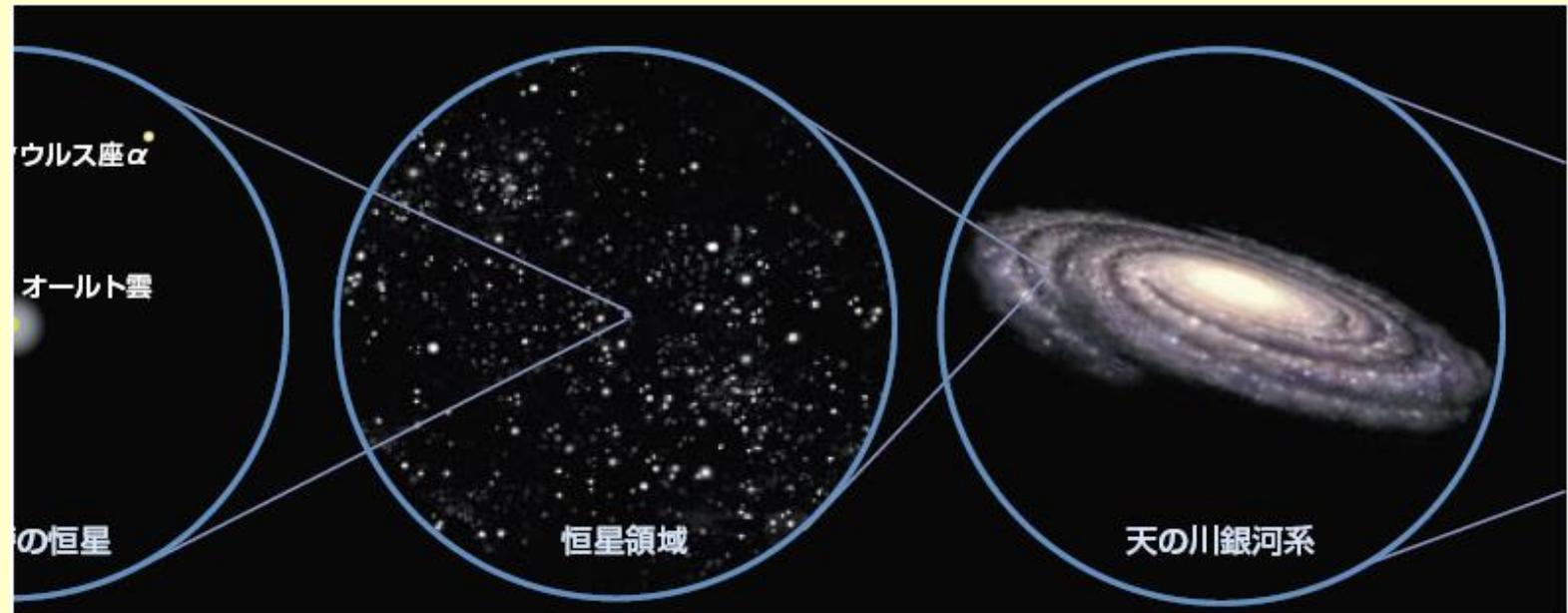


1 10 100 1千 1万 10万 100万 1千万 1億光年  
おおよの大きさ(光年)

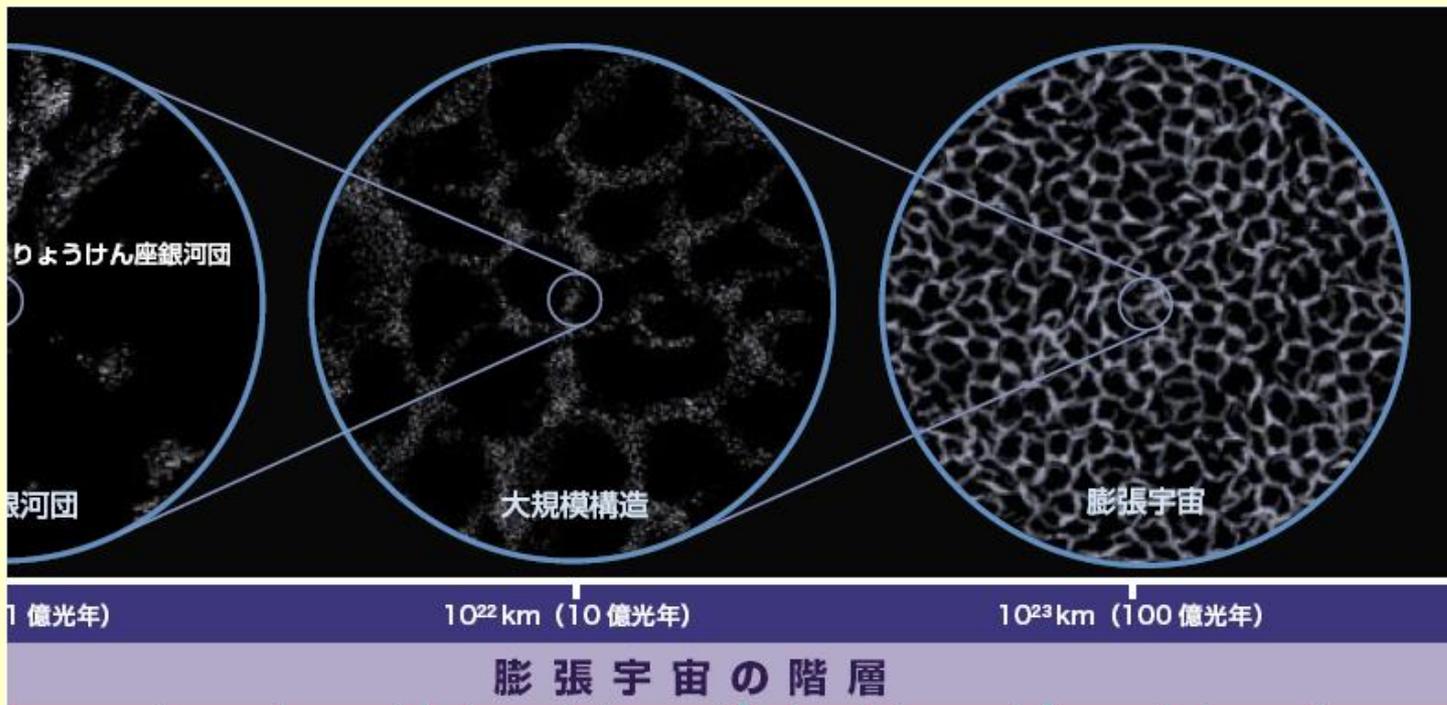
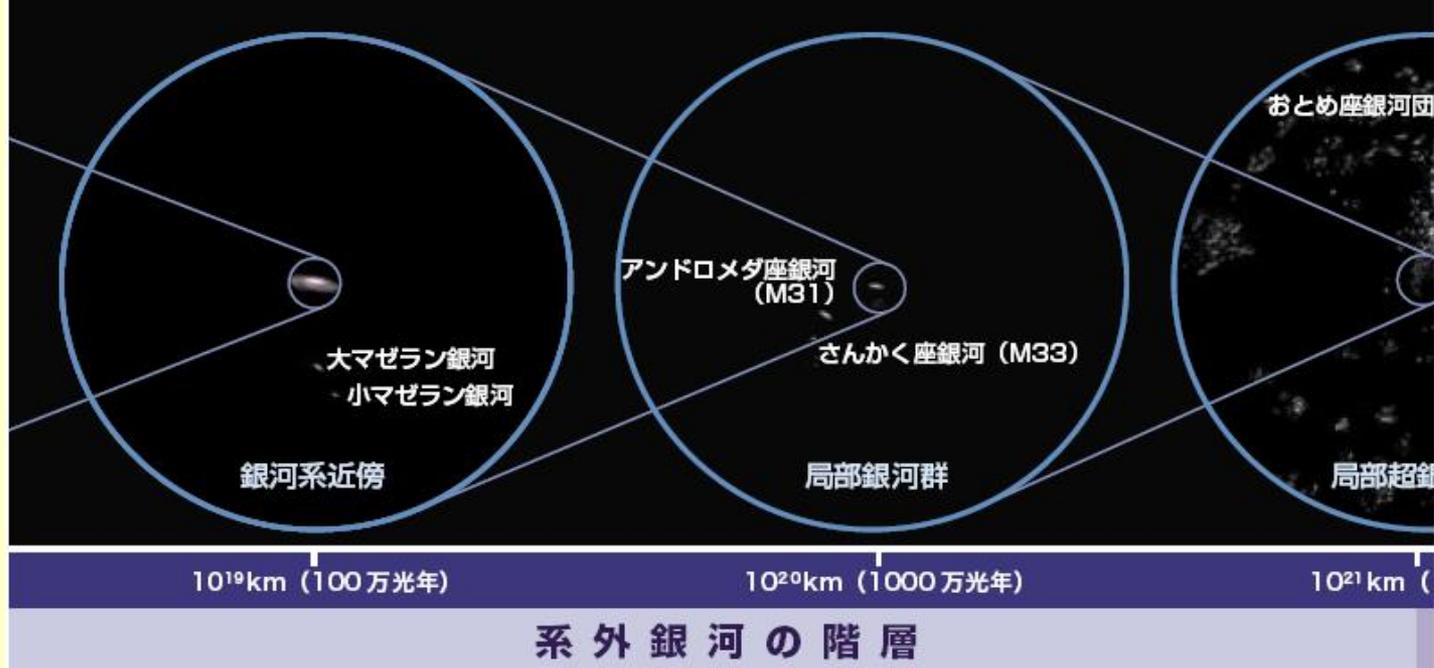
1光年 = 光の速さ(秒速約30万km)で1年間進む距離  
= 約  $9.5 \times 10^{12}$  km (9兆5000億km)



### 太陽系の階層



### 天の川銀河系の階層



これから“宇宙旅行”！

実感（?!）してみてください

いざ、宇宙の旅へ

## 2. どうやって宇宙の“広さ”が 分かってきたの？

天体までの距離決定



天文学の基本情報！  
地味だけど非常に重要なもの

しかし、天体は非常に遠い  
=> 距離測定は困難！

従って、精度良い距離測定は天文学の重要分野

# ★距離測定の困難さ

宇宙では天体までの距離は莫大な範囲に広がっている

⇒すべての天体に応用できる距離測定法はない。

天体までの距離とさらには天体の種類に応じて異なった方法が用いられる。

# ★宇宙の距離はしご

近くの天体までの距離測定結果を用いて、さらに遠方までの距離を導出していく。

近傍から遠方へと天体までの距離に応じて異なる手法をつないでいく方法を用いる。

あたかも「はしご」をつないで上へ上へと登っていく感じ



田中 雅臣 「あの星まで〇光年!? 宇宙の距離はどうやって測る? 宇宙の距離を測る新たな手法とは」

<https://gendai.media/articles/-/90248?page=2>

# 宇宙の距離はしご

## 宇宙の距離はしご

広大な宇宙にちらばる天体までの距離は、一つの方法だけでは求めることができない。距離の測定は、天体までの距離ごとにステップが分かれている。近い天体の距離測定の結果を元にして、次のステップの距離測定が可能となる。



ニュートン2010年4月号「天体までの距離はどう測る？」ニュートンプレス

年周視差測定は  
距離はしごの土台

# ◎距離はしごの詳細

参考書

現代の天文学第1巻「人類の住む宇宙」(2.4節) 日本評論社  
4巻「銀河I」(6章) 日本評論社

## ★銀河系内の星までの距離測定

ステップ1: 地球から太陽までの距離 (地球の軌道半径)

方法:

1. 力学法則(ケプラーの第3法則)をもちいる。

「惑星の公転周期の2乗は、惑星の軌道長半径の3乗に比例する」

$$(P_p/P_e)^2 = (R_p/R_e)^3, \quad P_p: \text{惑星の公転周期}, P_e: \text{地球の公転周期}, \\ R_p: \text{惑星の軌道半径}, R_e: \text{地球の軌道半径}$$

2. 地球の軌道半径は、惑星と地球の間の距離と惑星の公転周期と地球の公転周期(1年)の比であらわすことができる。
3. 惑星の公転周期と地球の公転周期(1年)の比は観測から分かる。
4. 惑星と地球の間の距離は、レーダー法や惑星探査機を使ってkm単位で求める。



地球の軌道半径が、km単位で求まる

$$L = R_p - R_e = \{(P_p/P_e)^{2/3} - 1\}R_e, \quad R_p > R_e \text{ の場合}$$

## 参考 天文単位(au)について

\* 太陽系内天体までの距離や惑星の軌道半径などによく用いられる距離の単位

$$1 \text{ 天文単位} = 1.495978707 \times 10^8 \text{ km}$$

天文単位(au)～地球の軌道半径であるが、  
実際の地球の軌道半径ではない！！

注意: 実は、天文単位は1976年のIAU(国際天文学連合)によって、別の定義により定められた。その定義とは、質量が無視できるほどの粒子が摂動を受けずに、太陽の周りを完全な円軌道で、ある周期(約365.2568983日)で回る半径とされている。  
地球の軌道長半径は、1.00000261auとなっている。

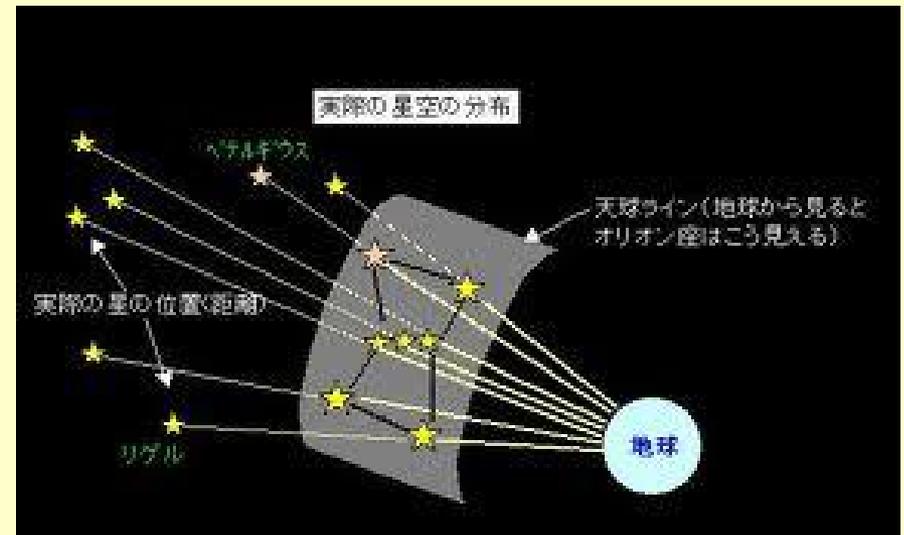
→  $1.495978707 \times 10^8 \text{ km} \pm 3 \text{ m}$  (2012年7月まで)

2012年8月のIAU総会 →  $1.495978707 \times 10^8 \text{ km}$  (定義)

# ステップ2: 太陽系近傍の星までの距離

## \* 星までの距離はどうやって分かるの？

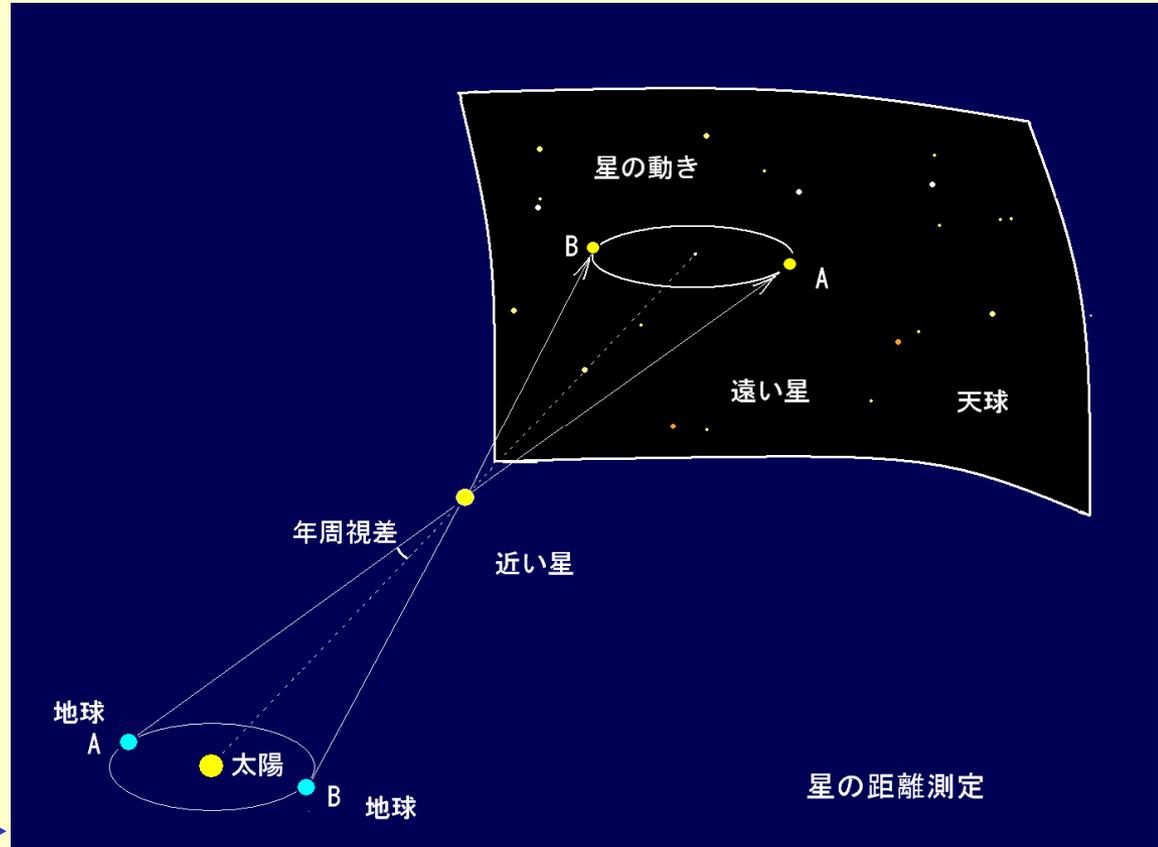
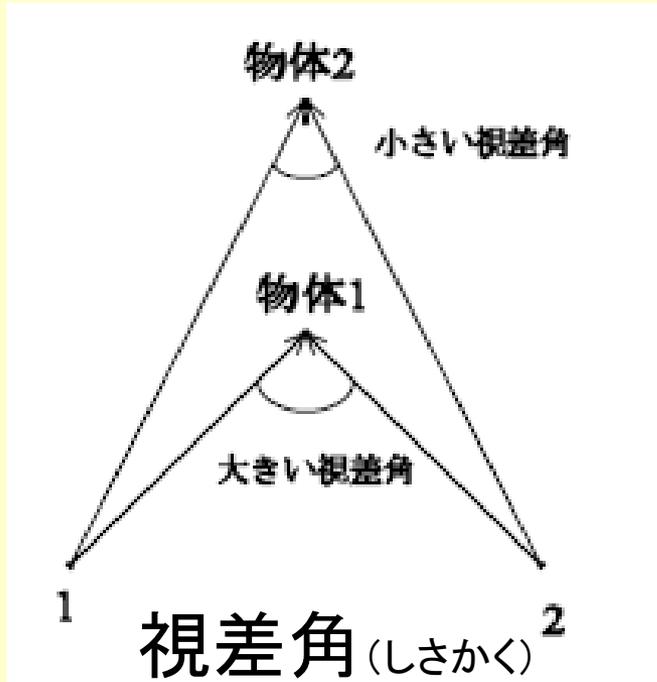
星座の星はお互い近くにあるわけではない。  
距離はかなり違う！



# ○距離をきめる方法のしくみ

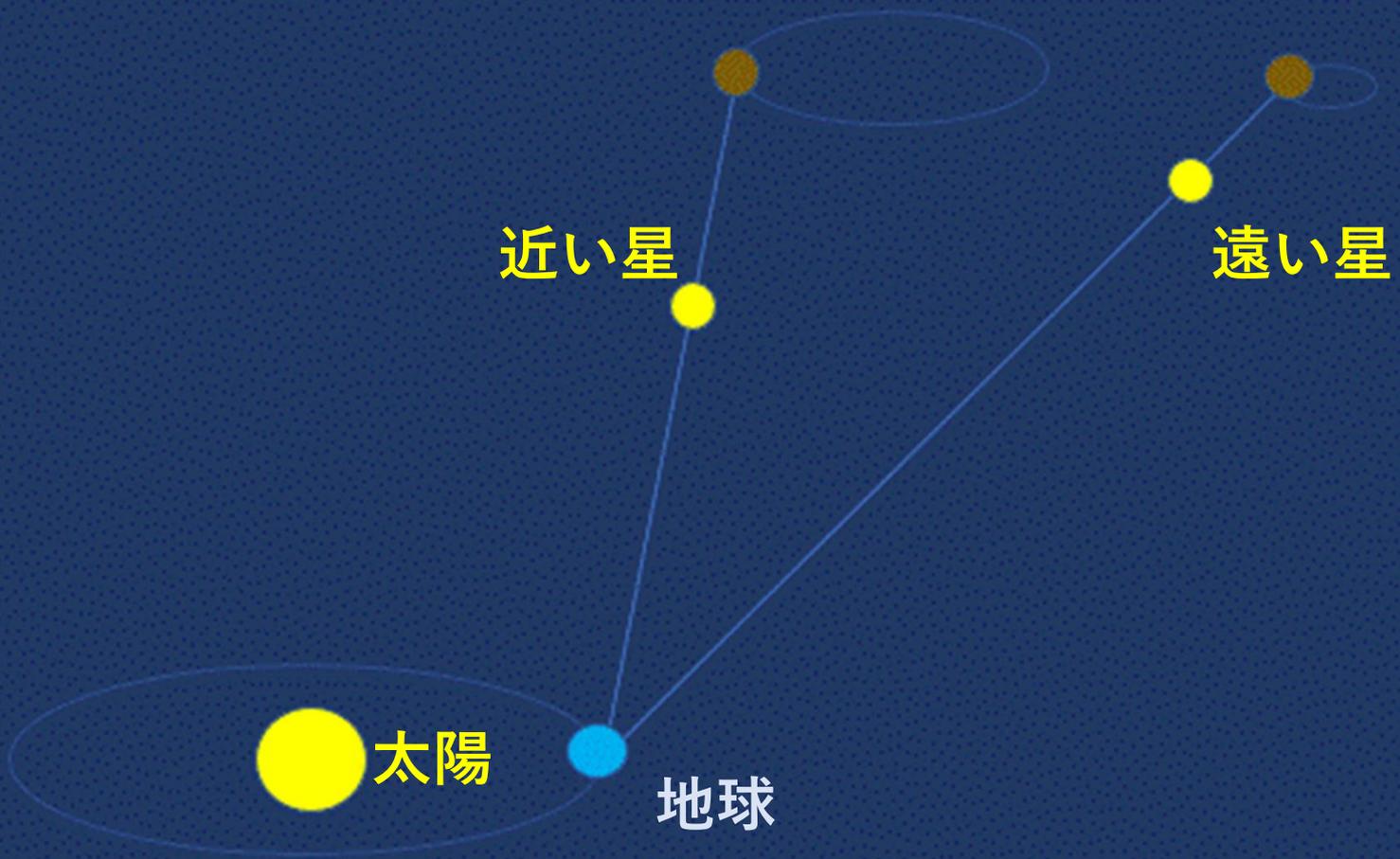
⇒ **三角測量(さんかく・そくりょう)**

星までの距離を直接的に測る方法としてもっとも信頼できる方法

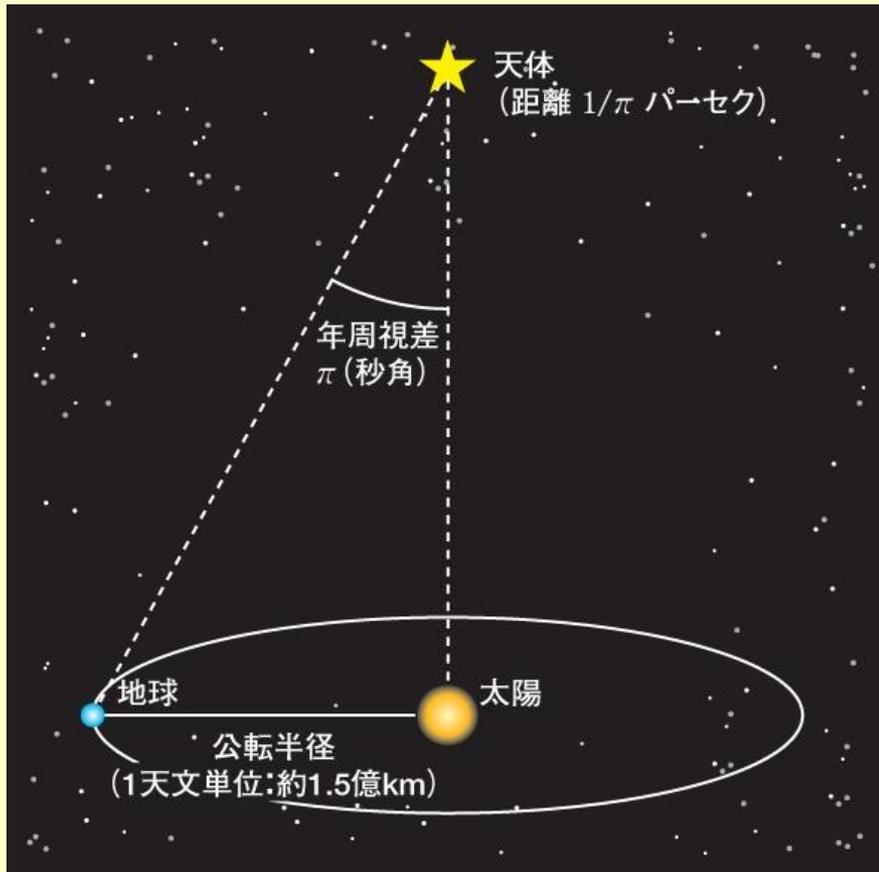


地球の公転を利用 ⇒

**年周視差(ねんしゅう しさ)の大小で距離の長短がわかる**



# 距離単位の定義



年周視差が1秒角  
(1度角の3600分の1)  
となる天体

→ その天体までの距離を  
1パーセク(pc)と定義  
(parallax second)

(図は理科年表のHPより)

三角関数をもちいると計算できて、

$1\text{pc} = \text{約} 3.09 \times 10^{13}\text{km} = \text{約} 2.06 \times 10^5\text{天文単位} =$

$\text{約} 3.26\text{光年}$  (1光年は、光の速さで1年で到達する距離)

# 参考:その他の距離測定法

\* 統計視差法

\* 運動星団の収束点法

参考書

現代の天文学第I巻「人類の住む宇宙」(2.4節) 日本評論社

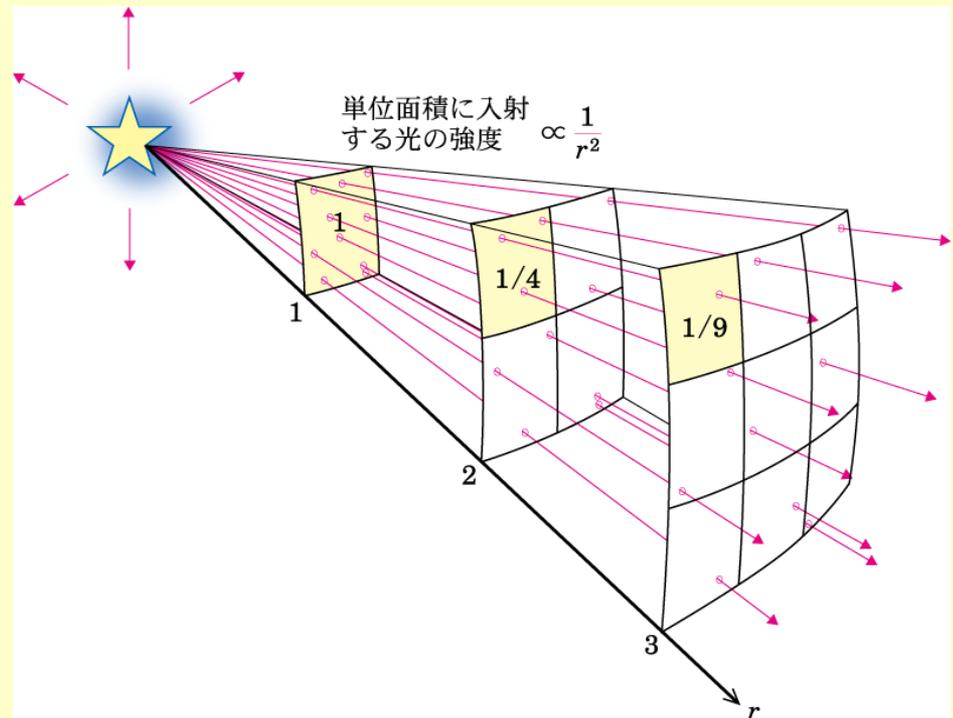
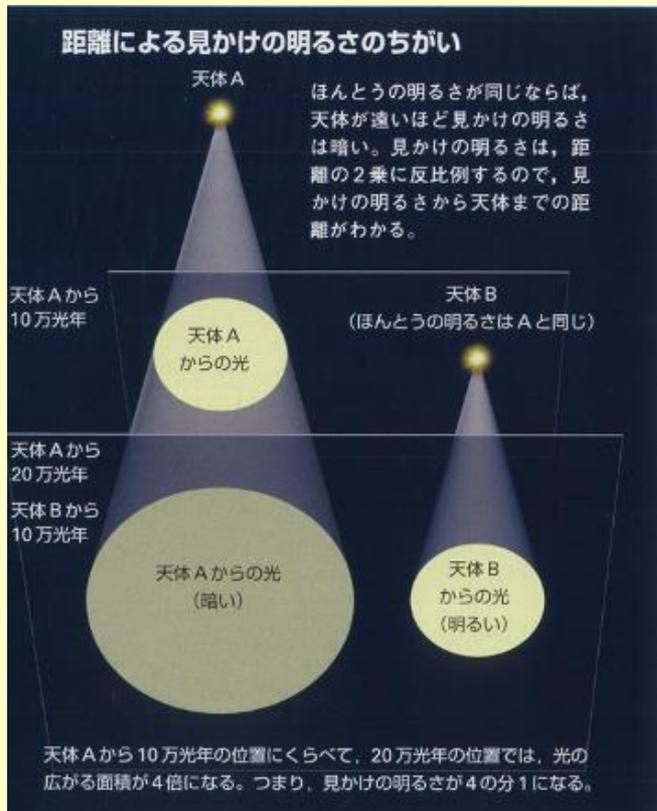
4巻「銀河I」(6章) 日本評論社

# ★近くの銀河までの距離測定

## ステップ3: 標準光源法による近くの銀河までの距離測定

真の明るさが既知である天体(標準光源とよぶ)を用いて、  
その見かけの明るさを測定することにより、距離を知る方法

\* 見かけの明るさは、真の明るさに対して距離の2乗で暗くなっていくことを使う。



ニュートン2010年4月号「天体までの距離はどう測る？」ニュートンプレス

天文学事典(日本天文学会)より

参考:  $m-M=5\log R-5$

$m$ : 見かけの等級

$M$ : 絶対等級 (10pcに仮に天体をおいたときの等級)

$R$ : 天体までの距離(pc)

○銀河系内でも視差法で直接的に測れないほど遠方にある星に適用。

○信頼度の高い標準光源はそれほど明るくないので、近傍銀河内のものしか観測できないが、宇宙の距離はしごの基礎となる。

**もっとも信頼度の高い標準光源**

**=> 変光星: 1次距離指標とよばれる。**

**セファイド変光星: 絶対等級-6等級から-2等級**

**周期約1日から約50日**

**こと座RR型変光星: 絶対等級は0等級程度**

**周期は、約2時間から1日**

**ミラ型変光星: 絶対等級は-1等級から-3等級程度**

**周期は約100日から700日**

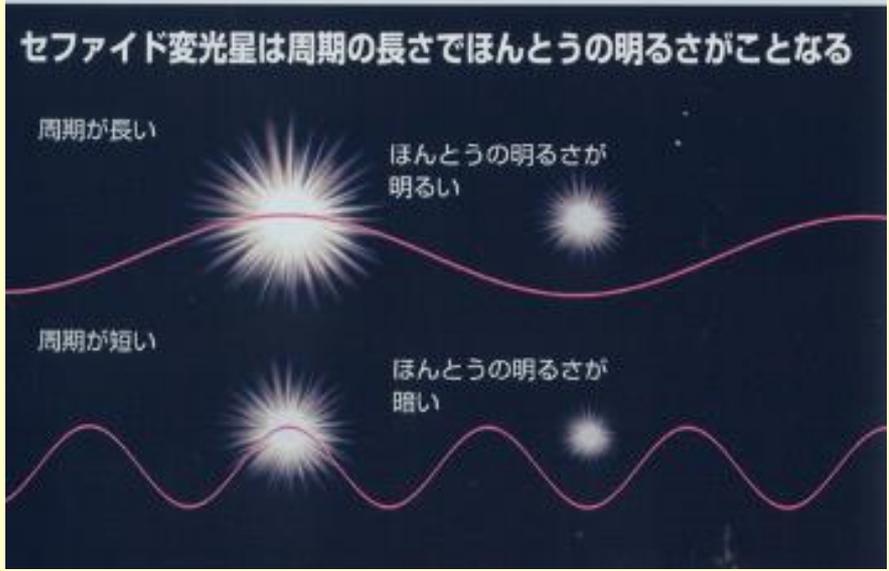
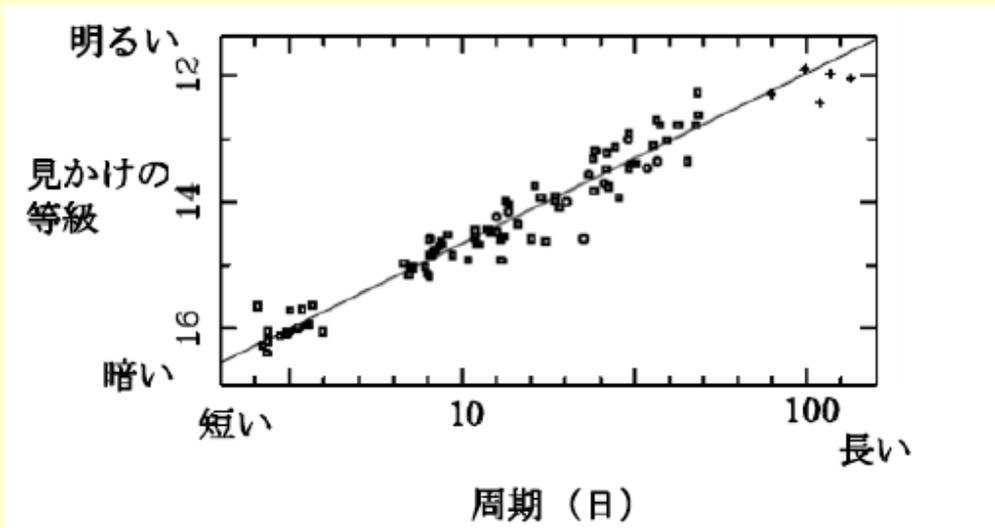
# どうやって、真の明るさ(絶対等級)が分かるのか？

## 周期—光度(明るさ)関係

例:セファイド変光星

周期が長いほど  
本当の明るさは明るい

大マゼラン星雲中のセファイド変光星の  
周期—見かけの等級の関係



ニュートン2010年4月号「天体までの距離はどう測る？」ニュートンプレス

1. 年周視差  
=>セファイドの距離  
=>セファイドの真の明るさ(絶対等級)
2. 周期—見かけの明るさの関係  
=>周期—真の明るさの関係が分かる！！

遠くて直接的に距離が分からない変光星：  
どうやって距離が分かるのか？

## 周期を測定

⇒ 周期－真の明るさの関係

⇒ 真の明るさ(絶対等級)

⇒ 絶対等級と見かけの等級を比較して

距離を出す。      参考： $m - M = 5 \log R - 5$

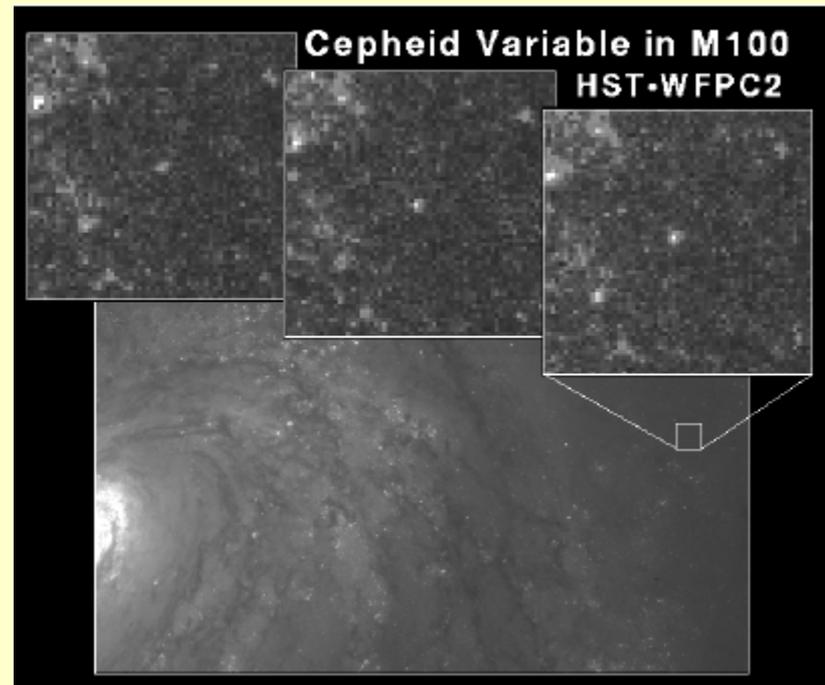
\* 近くの銀河中にセファイドが見つければ、以上のような方法でその銀河までの距離が求まる。

# セファイド変光星でどこまで銀河の距離が測定できているか？

○ハッブル宇宙望遠鏡=>約4000万pc(1億3千万光年)の銀河まで。

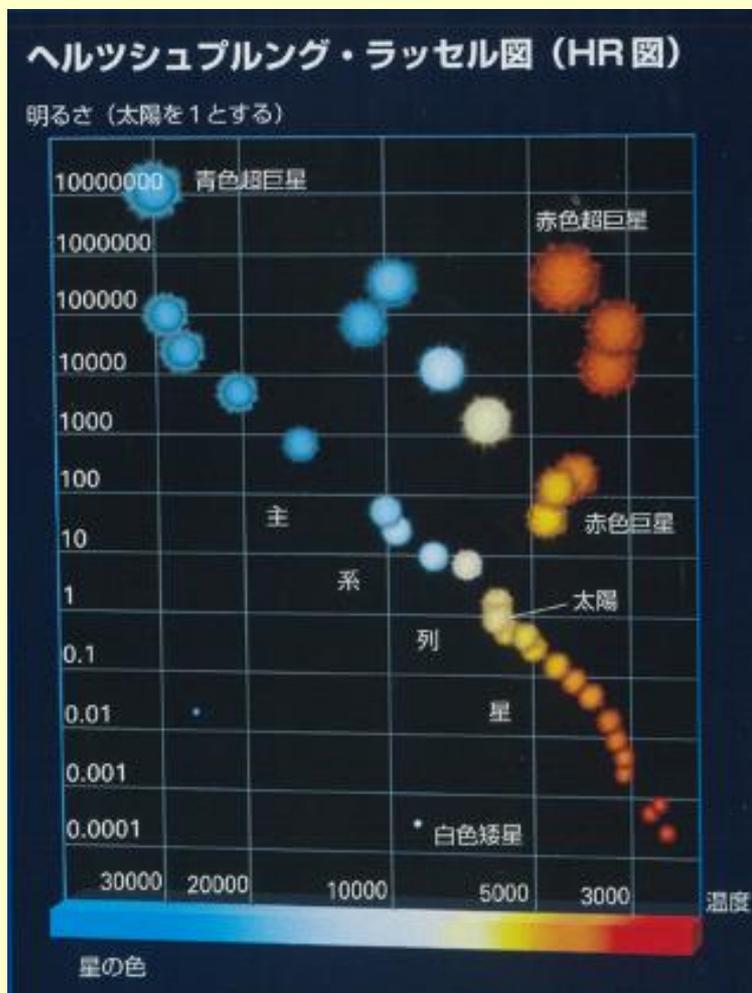
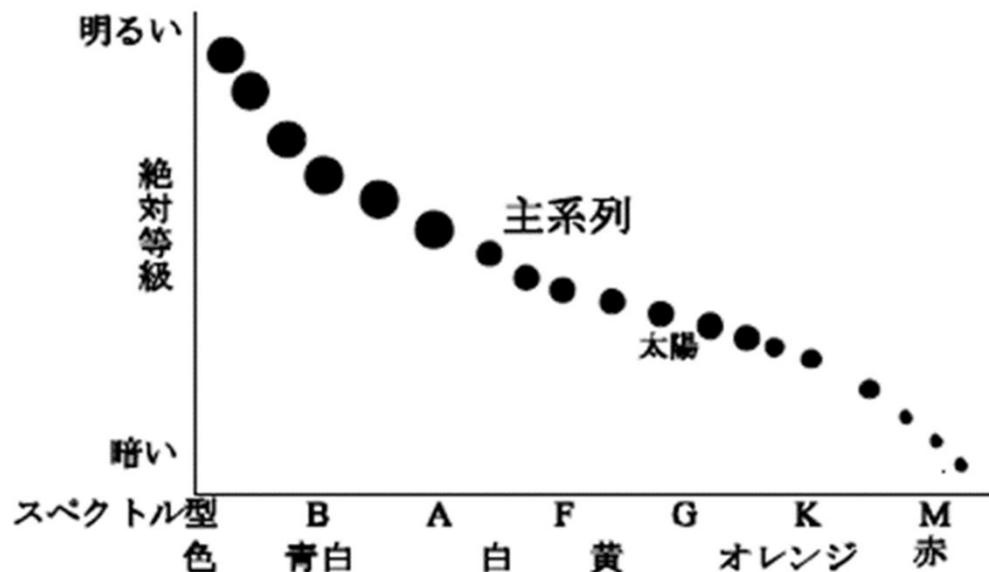
M100:約1900万pc先

約50個の銀河の距離を決定



# 参考: 分光視差法

主系列星(太陽のように中心で水素が燃えている星)の色一絶対等級関係を用いる方法



現代の天文学第I巻「人類の住む宇宙」(2.4節) 日本評論社

# ★遠方銀河までの距離測定

& 宇宙の距離はしごのまとめ

## ステップ4: 2次距離指標を使っての遠くの銀河 までの距離測定

### ★2次距離指標

セファイドが見えないほど遠くにある銀河に対しては、セファイドよりもっと明るい標準光源を用いる。ただ、変光星よりは、信頼度が落ちるため、2次距離指標と呼ばれる。

### \* 2次距離指標の真の明るさ

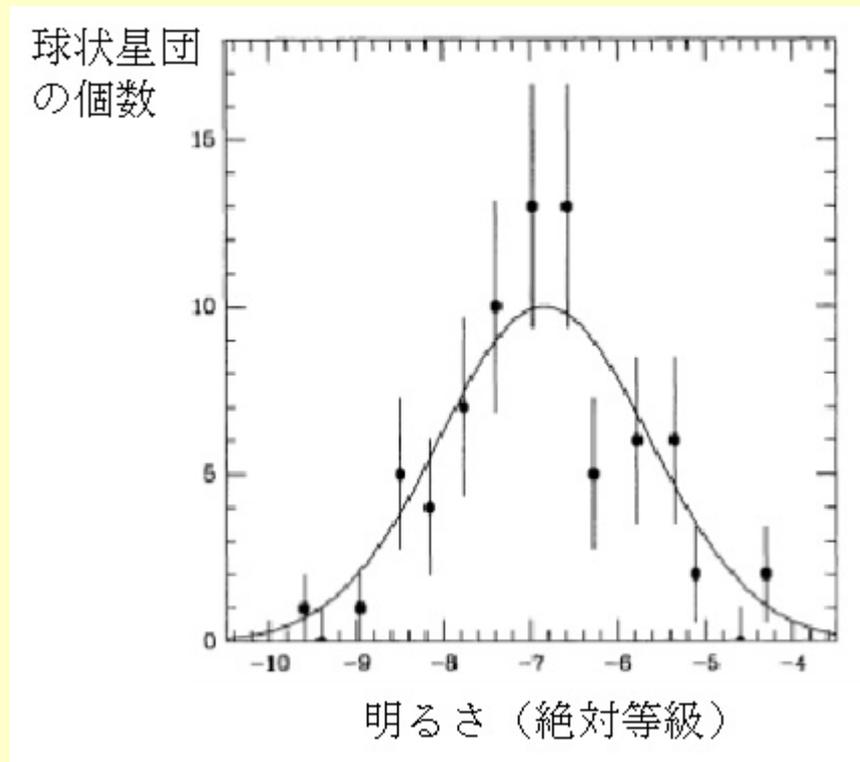
比較的近距离にあって、1次距離指標と2次距離指標がともに観測できる銀河を使って行われる。

# ★2次距離指標の例

## ○球状星団の光度関数

\*光度関数:ある明るさの天体がどれぐらいの個数存在するかを表す関数

ピークの明るさ  
=>どの銀河の  
球状星団も  
ほぼ一定



# ○惑星状星雲の光度関数

\*惑星状星雲: 低質量星が進化の途中の段階で周囲に吹き出したガスが輝いているもの

光度関数は、明るい側で急激に減る形: 急激に減るところの明るさ(もっとも明るいもの)が銀河に依らずほぼ一定

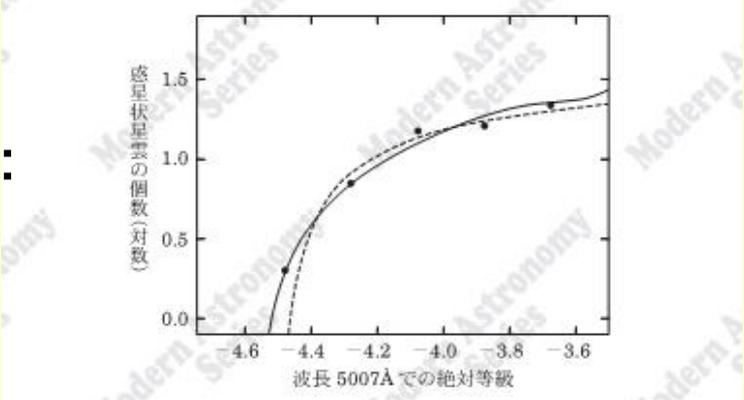


図 6.6 M81 の惑星状星雲の光度関数. 横軸は絶対等級に直してある. 実線は理論計算による予想. 点線は経験的に求められた解析的表現  $(N(M) \propto e^{0.307M} [1 - e^{3(M^* - M)}], M^* = -4.48)$  (Jacoby *et al.* 1989, *ApJ*, 344, 704).

# ○新星

現代の天文学第4巻「銀河I」(6.3節) 日本評論社

\*新星: 星が数日のうちに絶対等級で-9~-6等程度まで爆発的に明るくなり、その後数日から1年程度で、もとの状態にもどるもの。

新星がもっとも明るくなったときの絶対等級と、最大から2等級暗くなるまでに要する時間との間に相関がある。この関係から新星の絶対等級を推定できる。

# ○超新星

**Ia型超新星**: 最大光度が、銀河全体の明るさにも匹敵。  
遠方銀河でも観測可能。

\*超新星: 恒星の生涯の  
最後に起こる、星全体  
を吹き飛ばす  
大爆発現象

NGC4526銀河に出現したIa型超新星SN1994D  
(左下の明るい点)@  
NASA



**最大光度時の絶対等級が  
ほぼ一定**

注: はるか遠方の超新星が計画的に観測されている。銀河までの距離を決める指標としてよりも宇宙論に関わる宇宙全体の性質を決める手段としてめざましい発展を見せている。例えば、宇宙空間が現在は加速度的に膨張している結果が得られている。



→ ノーベル物理学賞(2011年: Perlmutter, Schmidt, Riess)

# ○銀河の距離指標関係

以上の距離指標も見えないほどもっと遠方の銀河に対しては、銀河全体を標準光源として用いる。

しかし、銀河の真の明るさは、銀河毎に1000倍近い違いがある。

では、銀河の真の明るさをどう推定するか？

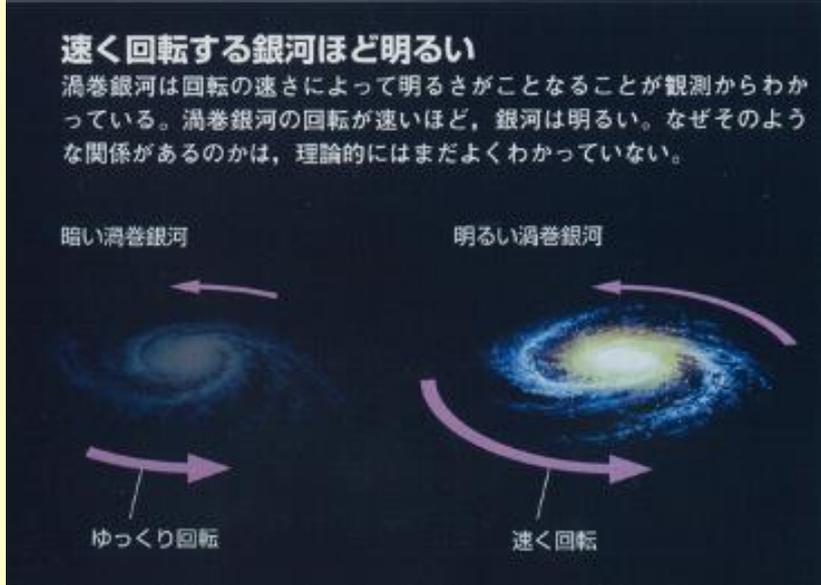


いくつかの**経験則**を使う：**距離指標関係**と呼ばれる

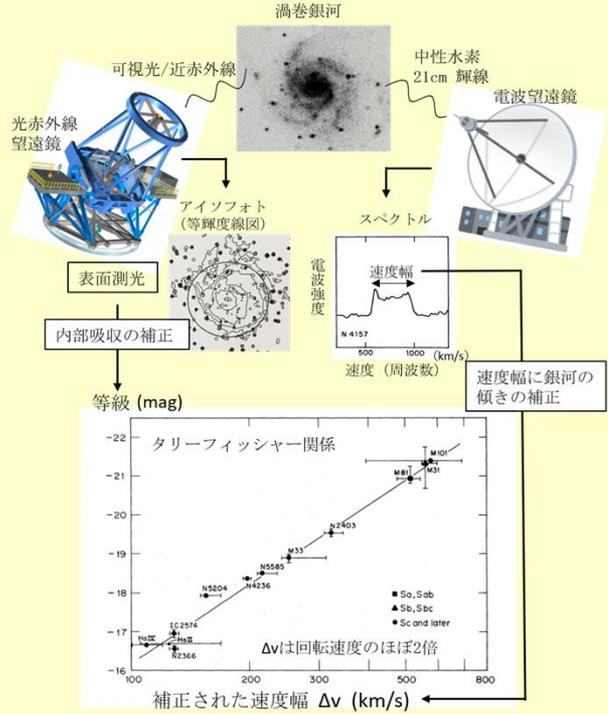
# ★距離指標関係の例

## ○タリー-フィッシャー(TF)関係

渦巻き銀河の明るさと  
銀河の回転速度との関係  
明るい渦巻き銀河ほど  
回転速度が速い

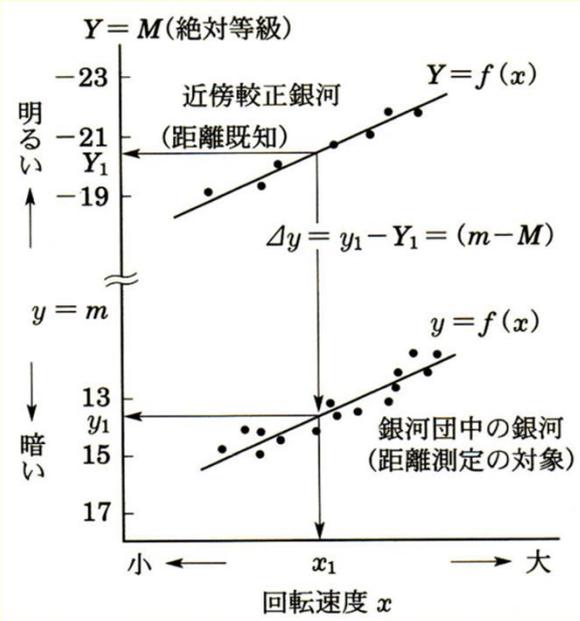


ニュートン2010年4月号「天体までの距離はどう測る？」ニュートンプレス



天文学事典(日本天文学会)より

### 距離指標関係の概念図



# ○ファイバー-ジャクソン関係

## 楕円銀河の明るさと星の速度分散

\* 速度分散: 星が無秩序な運動をしているが、その速度の目安となる量

# ○Dn- $\sigma$ 関係

## 楕円銀河の大きさと星の速度分散との関係

参考書

現代の天文学4巻「銀河I」(6章) 日本評論社

# 参考:その他の方法

## ○面輝度ゆらぎ法

\*面輝度:銀河の画像中の単位面積あたりの明るさ

面輝度は、銀河までの距離に依らず一定であるが、面輝度揺らぎは距離が遠くなるほど小さくなり、なめらかになる性質を用いる方法。

## ○標準光源法以外の方法

- \* 重力レンズ法:重力レンズ像間の変光現象と時間差を利用
- \* スニアエフーゼルドビッチ法:銀河団中の高温プラズマと宇宙背景放射との相互作用を利用
- \* II型超新星の膨張光球法

参考書

現代の天文学4巻「銀河I」(6章) 日本評論社

# ★より遠方: 赤方偏移(膨張速度)と距離の関係を使う

## ハッブル-ルメートルの膨張則

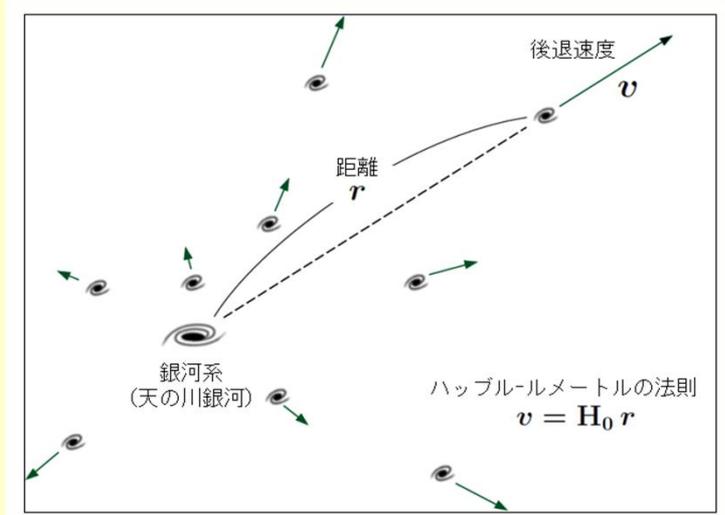
$$v = H_0 r$$

\* 後退速度は、ドップラー効果を用いた測定

\* この法則自体は、遠方の銀河の距離を前述した方法で測定した結果、得られたもの



## 宇宙の大構造の発見



ハッブル-ルメートルの法則のイメージ図 (作成 岡村定矩) 天文学事典(日本天文学会)より

「ハッブルの法則」で距離をはかる

遠い銀河ほど速く遠ざかり、波長がより長くなる(赤方偏移)。

波長

遠ざかる銀河

波長

遠ざかる銀河

右は、ハッブルの法則の式を式変形したもの。rは地球と銀河の距離、vは銀河が遠ざかる速度、H<sub>0</sub>はハッブル定数である。赤方偏移の度合いからわかる銀河の遠ざかる速度をハッブル定数で割ると、その銀河までの距離がわかる。

$$r = \frac{v}{H_0}$$

73

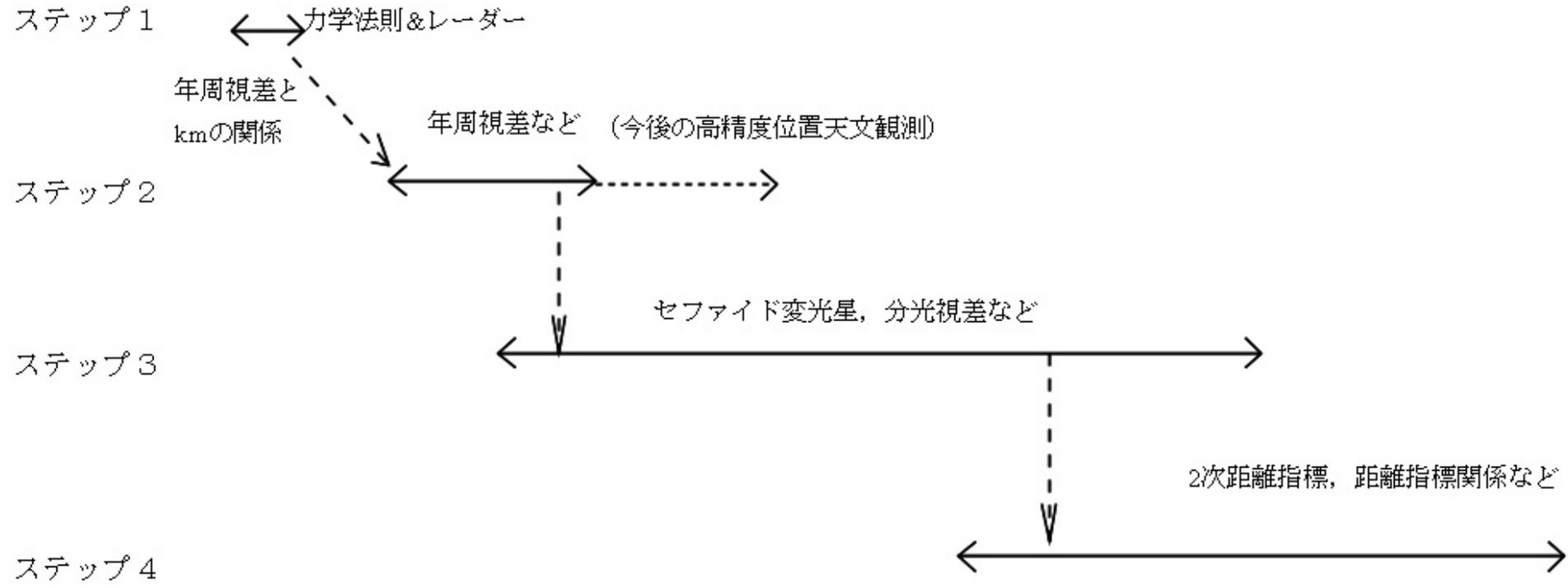
ニュートン2010年4月号「天体までの距離はどう測る？」ニュートンプレス

\* 注意: 近距離の銀河にはこの法則により距離を導出するのは困難。

銀河の“固有速度”の影響。  $v = H_0 r + v_p$

# ★宇宙の距離はしごのまとめ

太陽系 (10万分の1pc)	ヒアデス星団 (40pc)	天の川銀河 (~1万pc)	アンドロメダ銀河 (70万pc)	おとめ座銀河団 (1800万pc)	遠方銀河 (>2000万pc)
-------------------	------------------	------------------	---------------------	----------------------	--------------------



現代の天文学第I巻「人類の住む宇宙」(2.4節) 日本評論社

**年周視差測定は  
距離はしごの土台**

宇宙の距離はしご=>人類は宇宙の広さの認識を拡大  
新たな物理法則の発見にも  
つながった。

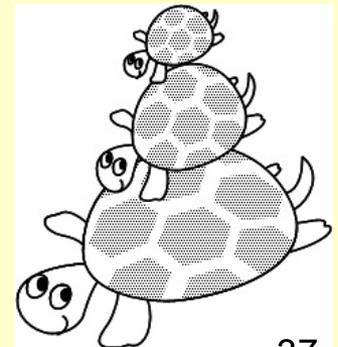
例:バブルの法則:遠方銀河ほど、速い速度で  
我々から遠ざかっている。  
=>宇宙空間の膨張

しかし。。。。

親亀の背中に子亀、その背中に孫亀のせて。。。。



親亀こけたら、皆こける。。。。



実際。。。

ヒッパルコス衛星による年周視差の観測結果

=>セファイド変光星の明るさが、従来の結果より、  
20%程度明るい

=>大マゼラン星雲までの距離が10%程度  
遠い！？  
物議をかもした。

★土台となる年周視差による測定が重要！

### 3. 宇宙の距離はしごの“土台”：位置天文観測とは？

天の川銀河内の星までの距離

星の運動



星の立体地図



星の基本情報

天文学、宇宙物理学の様々な分野の研究に関わるデータ

\* 他の銀河は遠すぎて、個々の星の距離や運動速度は観測できない

# 星の位置分布(3次元地図)、星の運動



**位置天文学** 天文学の中で最も古い天文学の観測分野



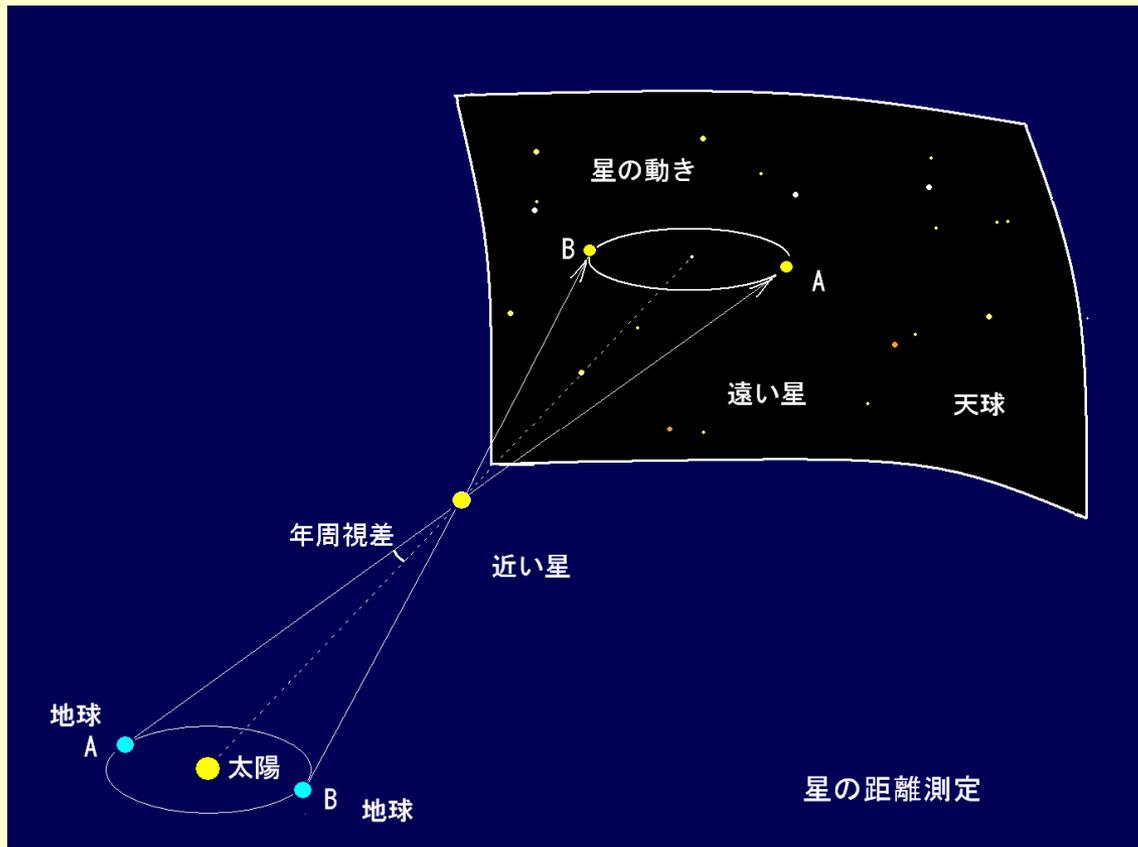
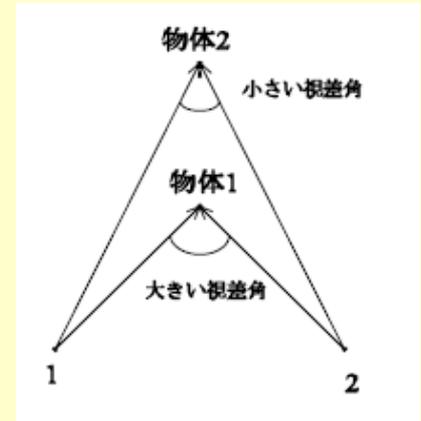
恒星は、天球面上(夜空)で一般的には、らせん運動をしている  
\*らせん運動=(年周)楕円運動+直線運動(固有運動)

星がまるくまわっているように見えるのは、地球が太陽のまわりを回っているから。

○距離を決める方法のしくみ

=> **三角測量**

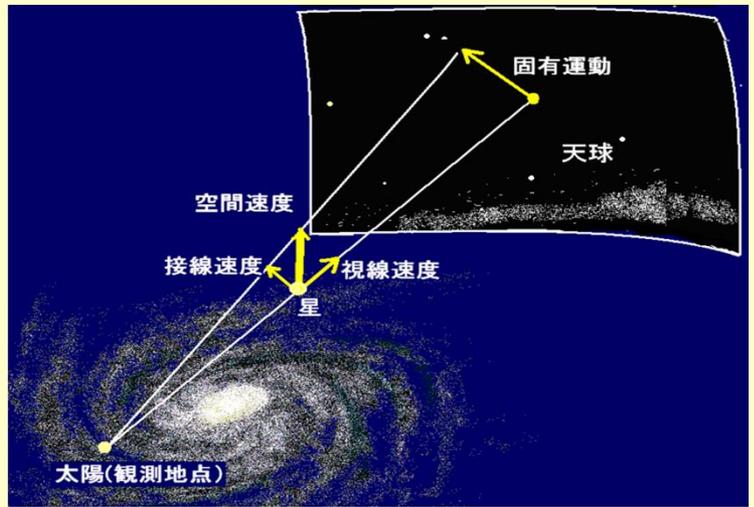
星までの距離を直接的に測る方法としてもっとも信頼のおける方法



# ★ 星座を形作る星(恒星)も動いている！

## まっすぐな運動

星が、まわりの星やダークマターによる万有引力(重力)の影響を受けて独自に運動  
(秒速で数km~100km以上の場合も: 弾丸の速さ以上)



星は、非常に遠くにあるので、地球からみると天球上(夜空)での動きは、ゆっくり。



## しかし、何万年以上もたつとその変化に気づく

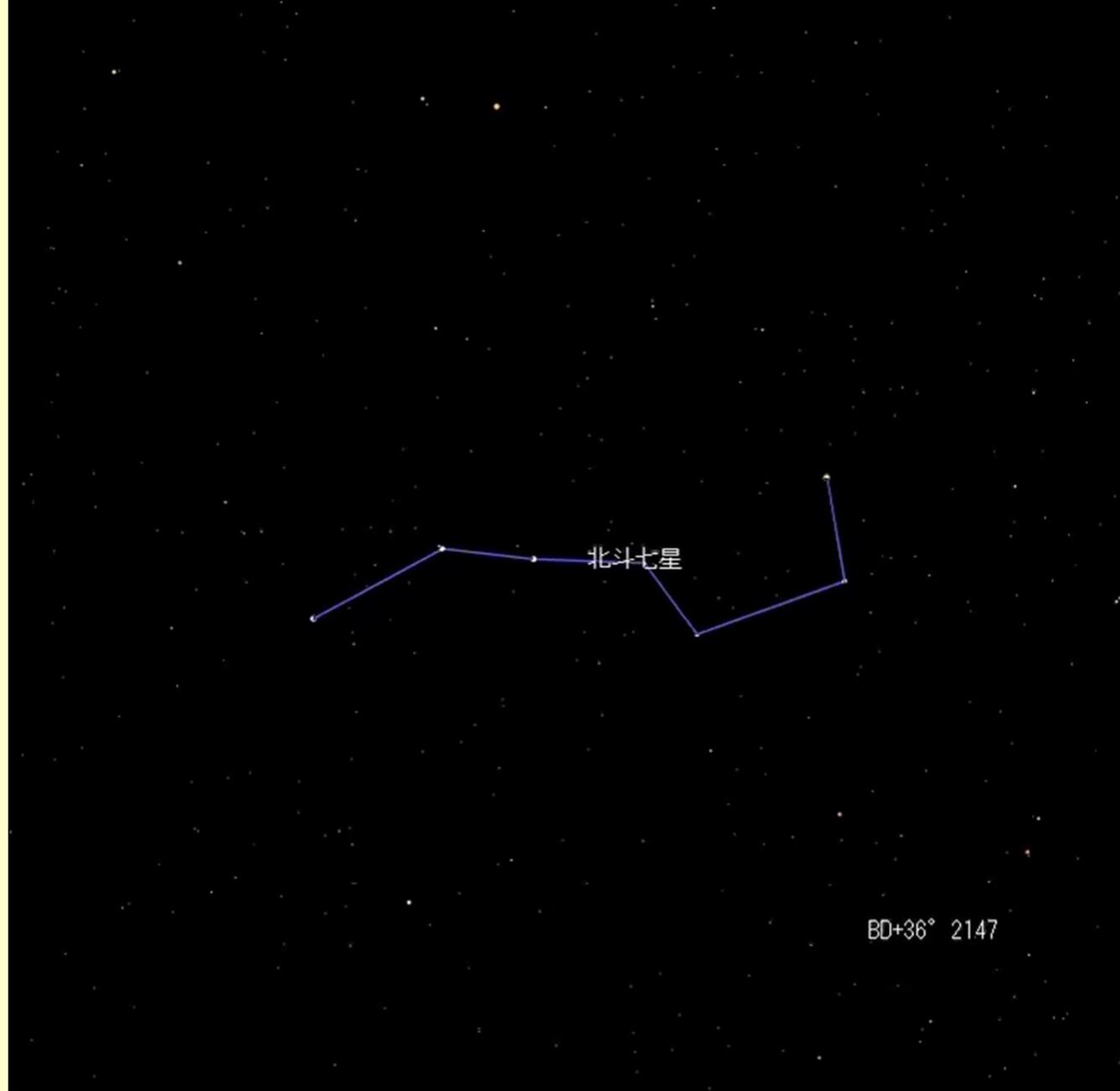


10万年後



北斗七星

未来へ



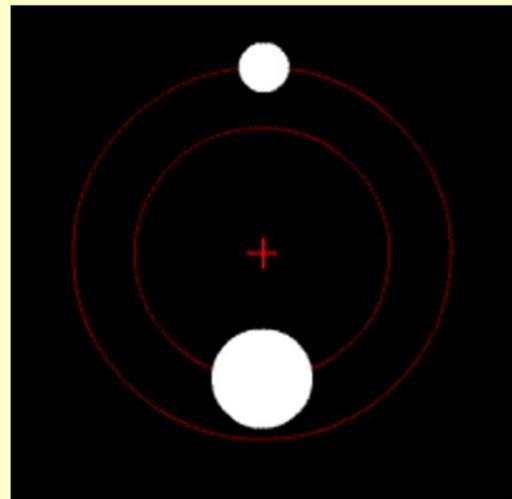
BD+36° 2147

HippLiner

透視投映モード ▾ 見かけの等級 ▾ 星座線描画 ▾

Epoch 0 ▾ 秒速 10 ▾ 光年 ▾ コマンド ▾ 星座線種別 ▾

# らせん運動からずれる星がある！



複雑 (ふくざつ) な運動 (うんどう) から  
わかる謎 (なぞ)

例1: 連星 (れんせい) や

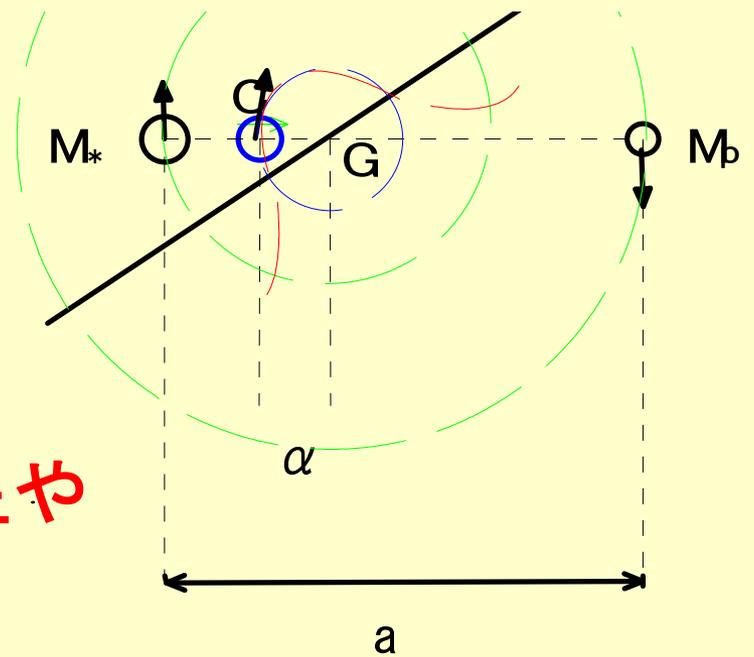
系外惑星 (けいがいわくせい) がある場合



星の周期的 (しゅうきてき) な  
ふらつきが起 (お) くる



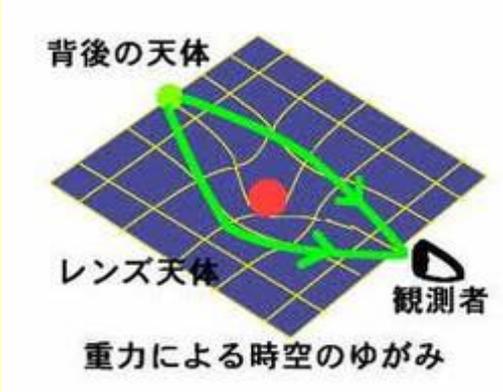
ふらつきの特徴 (とくちょう) から連星や  
系外惑星の質量 (しつりょう) などが  
予測 (よそく) できる



# 例2: 重力(じゅうりょく)レンズ効果(こうか)による星の動(うご)き

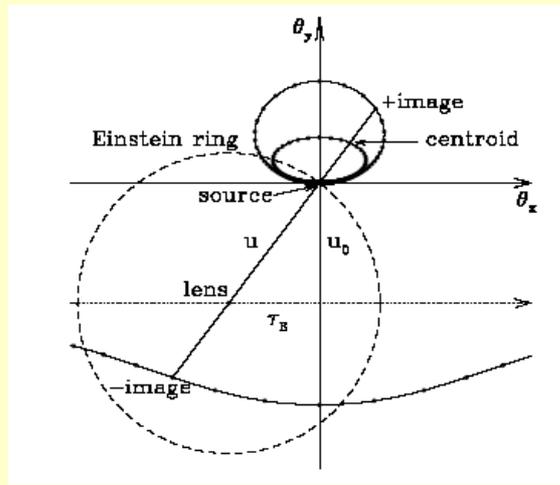
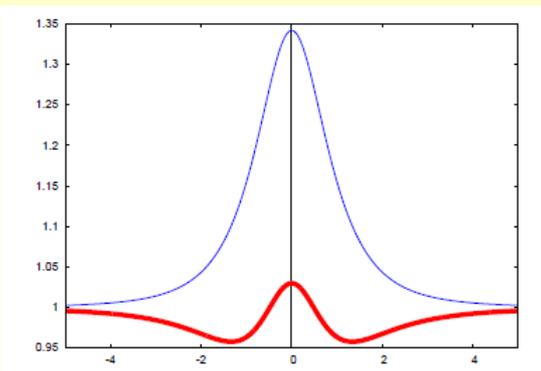
## 重力レンズ効果とは？

重力物質があると、  
一般相対論的効果(時空のゆがみ)により  
そばを通る光は曲げられる。



一時的な増光現象(ぞうこうげんしょう)

星の楕円運動(だえんうんどう)  
(年周視差楕円とは、周期も形も異なる)な増光現象



重力レンズ天体の質量、速度、距離が分かる

# ★星の天球上での位置とその動きを測定 →位置天文学

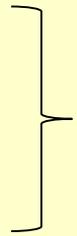
星の立体地図と運動を知る！ →さまざまな宇宙の謎をとく！



# 星の地図と動きに隠された謎を解く

星の3次元地図

星の運動



様々な天体の謎が解ける

天の川銀河の巨大ブラックホールも

見えないものが見える！



\* 重力場(場所毎の重力の強さ)が推測できる



ダークマターの空間分布や運動状態が推定できる！

→ 正体解明につながる

\* 過去の履歴が分かる



天の川銀河が進化してきた様子

巨大ブラックホールが中心部に落ち込んだ痕跡！？

巨大ブラックホールが、  
もし、より小さいブラックホールの  
合体でできていたら。。。  
→中心に比較的大きな

ブラックホールが落ちてくる

→中心の周りにある、たくさんの  
太陽のような星を  
“吹き飛ばしていく”

→中心のまわり(300光年程度以内)の星の数が減るが、  
その星の運動速度は速くなる！  
その痕跡は長く残っているはず



星の分布や運動速度を測定できれば、判別ができる！

\* **見えない**ブラックホールが、**過去**に落ちこんできたことが、  
**現在の星の位置分布や速度**から分かる！！

# ★位置天文学は何の役に立つのか？

年周視差

距離

星の**本当の明るさ**、放出している**本当のエネルギー**  
距離はしごの**ベース** => 遠方天体の距離の推定

天球上の位置 + 距離

星の3次元空間分布

天の川銀河構造の**サイズ**、**形状**、**構造要素**など  
星団の**サイズ**、**形状**など

固有運動 + 距離

星の**接線速度**

(視線速度に垂直方向)

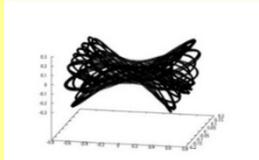
(視線速度情報を加味して) 星や星団の**3次元運動**

星の3次元

空間分布 + 運動分布

**重力場**や**重力物質**の**3次元位置**や**速度**の情報

\* (観測できていない) 星や**ダークマター**の  
**力学構造**、**軌道**



星、星団、銀河系構造の**形成**、**進化の痕跡**



**見えないものが見える！**

特殊な運動 (らせん運動(年周楕円 + 固有運動からのずれ)

連星系の**軌道**、連星の**物理情報**、系外惑星**探査**と**惑星**の**物理情報**、**重力レンズ天体**の**物理情報**など

# 位置天文観測は難しい！

## \* 実際の星の年周視差の大きさ

もっとも近い恒星であるケンタウルス座プロキシマ・ケンタウリでも、その年周視差は0.77秒角(4.22光年)

$$\begin{aligned} 1 \text{秒角(びょうかく)} &= 1/3600 \text{度角} \\ &= 0.00028 \text{度角} \end{aligned}$$

## \* 天の川銀河の中心にある星(約2万6千光年)

$$0.000000035 \text{度} = 125 \text{マイクロ秒角}$$

100km離れたところにいる人(例:東京から見て富士山頂にいる人)の髪の毛1本の太さ(ふとさ)を見込む(みこむ)角度(かくど)にひとしい。かみのけ

どのようにして、観測の精度を良くするか？

→これ自体が研究

→位置天文学

# ★位置天文学の歴史と現状

○天文学史上、最も古い分野

○古代エジプト

シリウスの日の出直前の出現

⇒ナイル川の氾濫：1年周期の発見

○紀元前2世紀のギリシアの天文学者ヒッパルコス  
春分点の移動(約45秒/年)



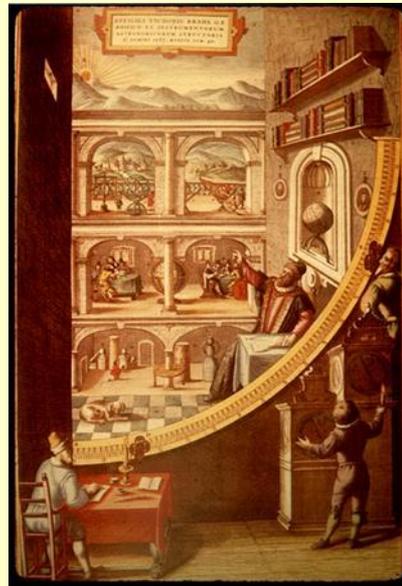
地球の自転軸が歳差運動(コマの  
首振り運動)

# ○16世紀のチコ・ブラーエ(最高の眼視観測者) 惑星の運動(約1分角の位置精度)

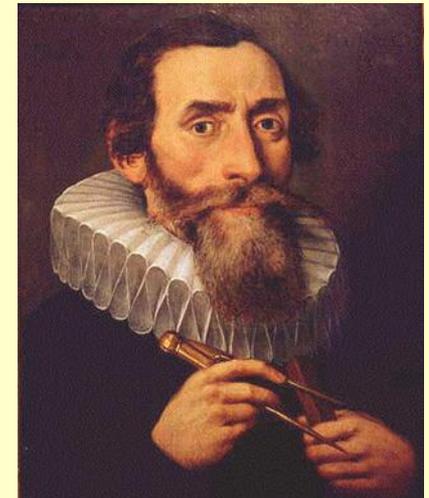
➡ ケプラーの法則

➡ ニュートン力学:近代物理学の誕生

チコ・ブラーエ (1546-1601)



ケプラー (1571-1630)



○1838年、ベッセルにより、年周視差が初めて検出される。

固有運動の大きな61 Cyg

(白鳥座61番星)をターゲット  
→ 0.3136秒角

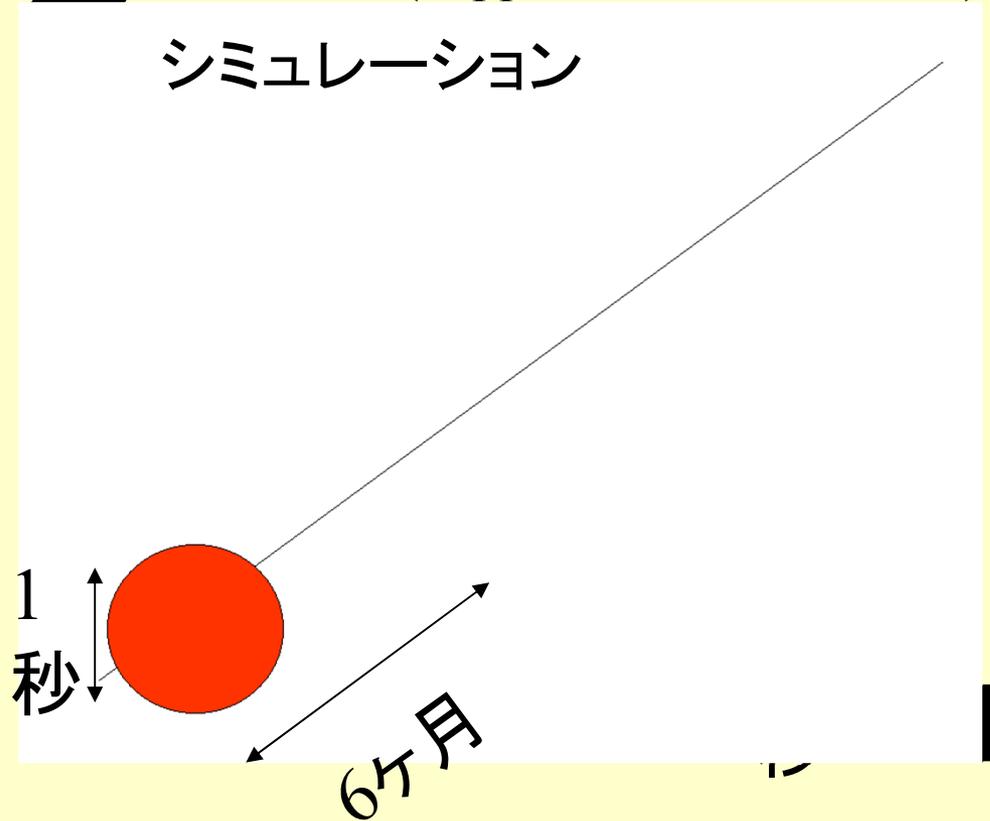
(Hipparcos: 0.28547秒角)



## 地動説の直接証明

1830'sは年周視差観測の先陣争いの時期

F.W. Bessel (1784 - 1846)



<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/text/bessel.htm>

# ○位置天文観測の精度 (せいど) のうつりかわり

古代ギリシア、古代エジプト

測定精度

紀元前150年：ヒッパルコス（天文学者） 1000秒角

(1秒角 = 1/3600 度)

↓  
1838年：ベッセル (年周視差の発見！！) ~0.1秒角

\* 地動説の直接証拠

↓  
1980年代：地上にある望遠鏡での観測 ~0.03秒角

↓  
\*地上での観測では、空気のゆらぎなどで精度があまり良くならない。  
宇宙空間へ(ヒッパルコス衛星(ESA)：1989年打ち上げ)

人工衛星に望遠鏡をのせて宇宙空間から観測→位置天文観測衛星

1997年：ヒッパルコスカタログ  
~0.001秒角

\* 1ミリ秒角

2013年～2025年：ガイア衛星  
~0.00001秒角



# ガイア (Gaia) による位置天文観測の大革命時代がやってきた！！

ヨーロッパ宇宙機関

大型の位置天文観測衛星 Gaia (ESA) は革命的：

**質**（10マイクロ秒角クラスの位置決定精度）、

**量**（15億個以上の星）とも画期的な星の位置、距離、速度情報が得られる時代になってきた！



## 天の川銀河の研究が大進展！！

Gaia

Credit: ESA

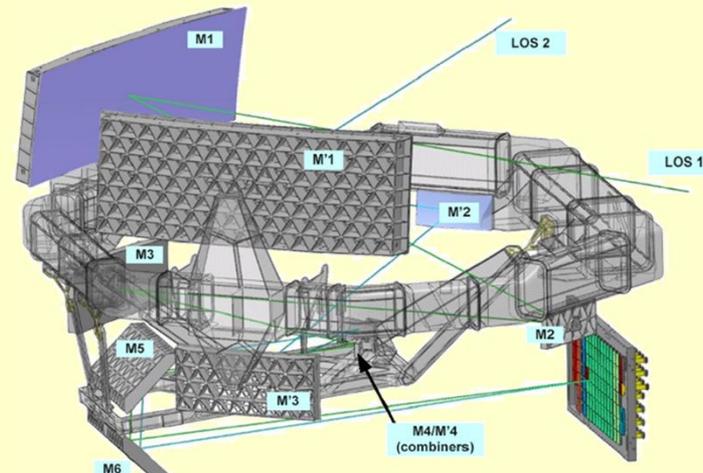


Figure courtesy EADS-Astrium

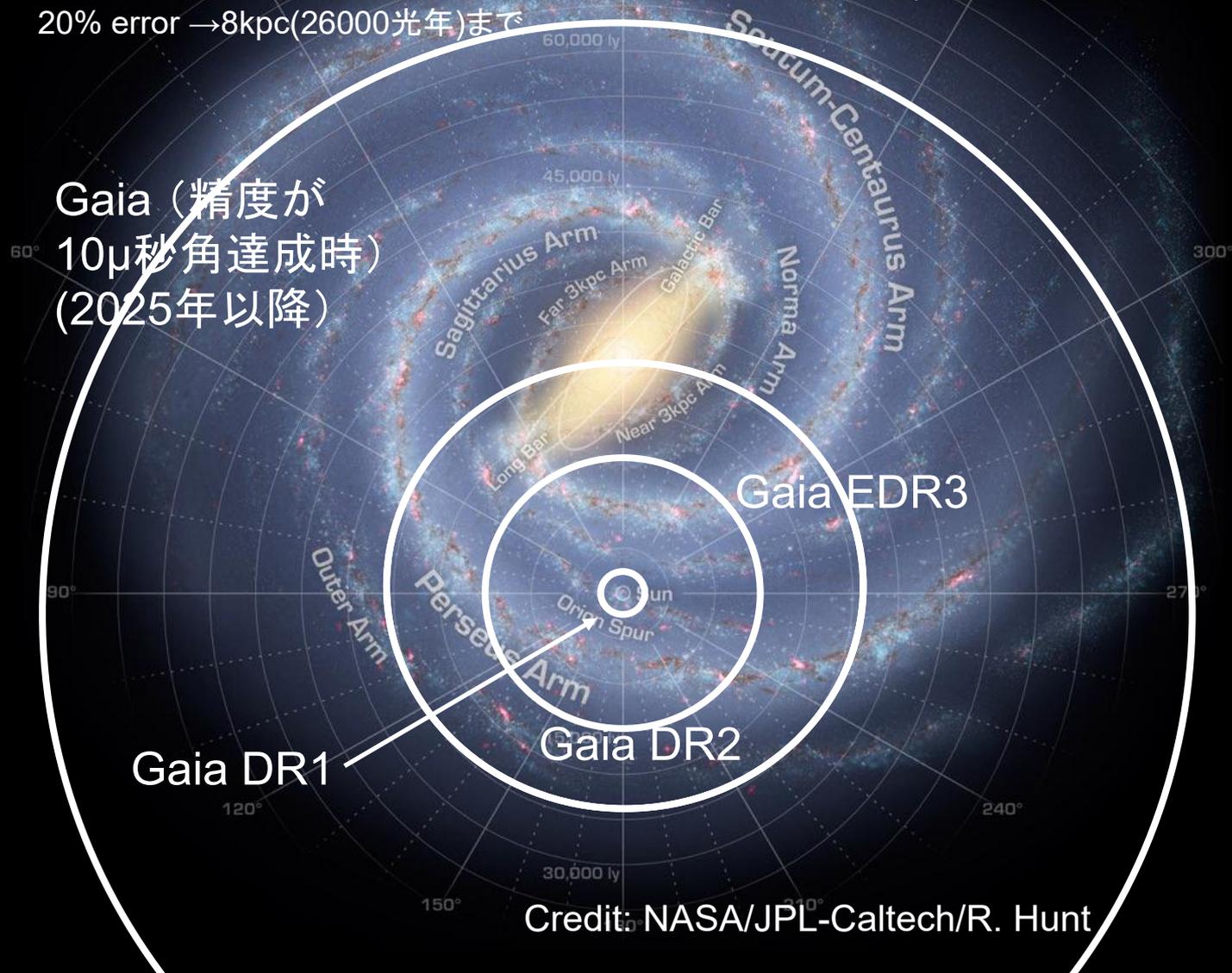
# 星までの距離の誤差 (3等級<G<15等級)

Gaia DR1(2016年9月公開): 年周視差の誤差:0.3 ミリ秒角,  
20% error →670pc(2200光年)まで

Gaia DR2(2018年4月): 年周視差の誤差:0.04 ミリ秒角,  
20% error →5kpc(16000光年)まで

Gaia EDR3(2020年12月): 年周視差の誤差:0.02 ~0.03 ミリ秒角,  
20% error →8kpc(26000光年)まで

Gaia (精度が  
10 $\mu$ 秒角達成時)  
(2025年以降)



Credit: NASA/JPL-Caltech/R. Hunt

# \* 銀河面のさざ波

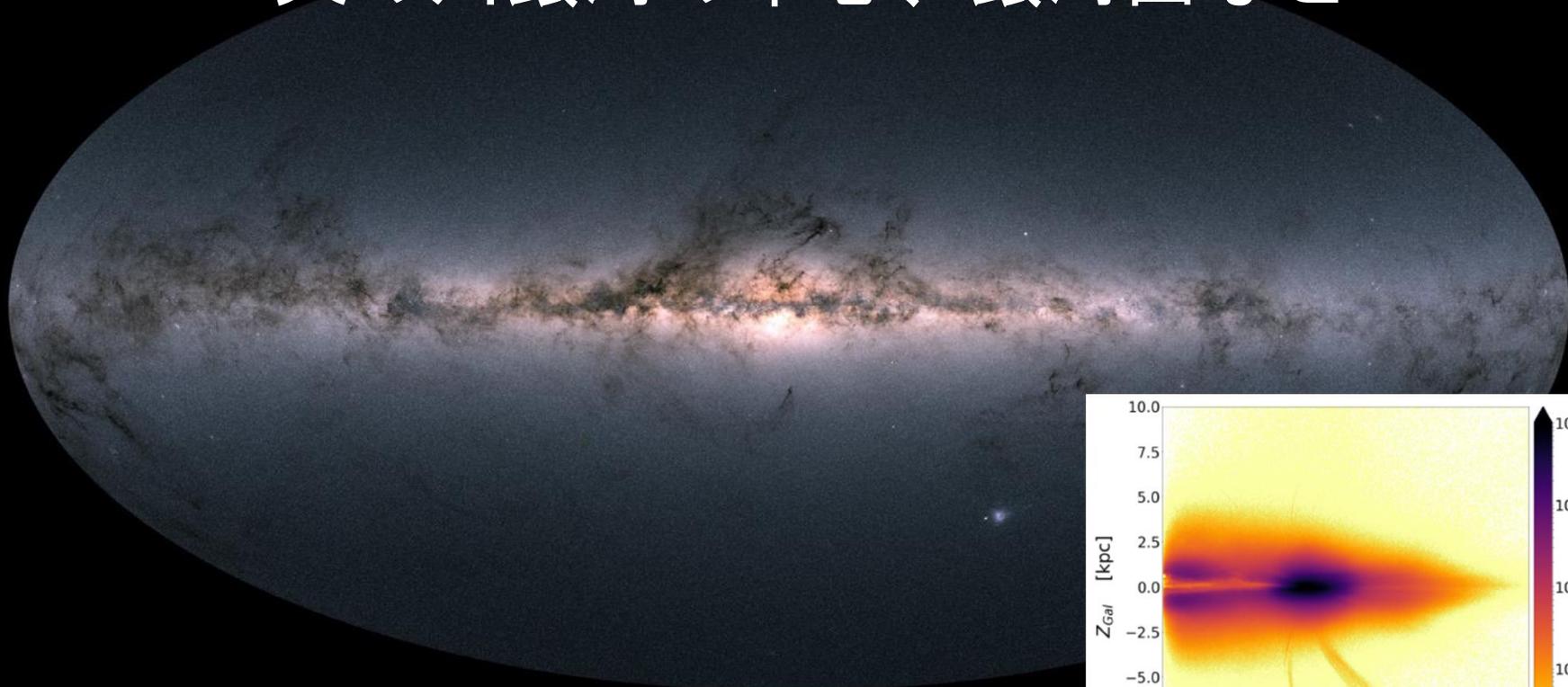
～銀河ディスク面に垂直な方向に沿って星の軌道が振動～



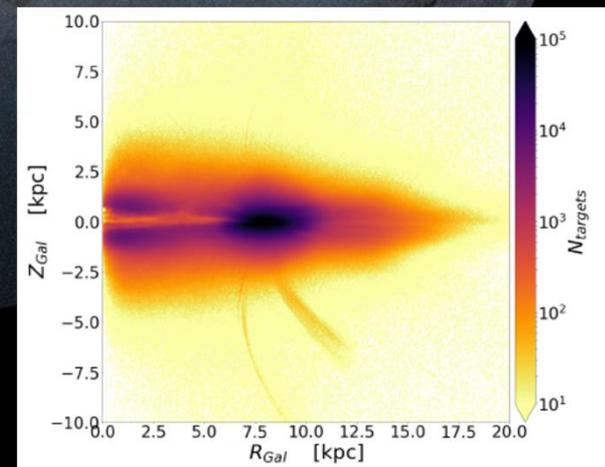
Credit: ESA

バー構造や渦状腕、矮小銀河の残骸の可能性

Gaiaでは、よく見えないところが！  
天の川銀河の中心、銀河面など



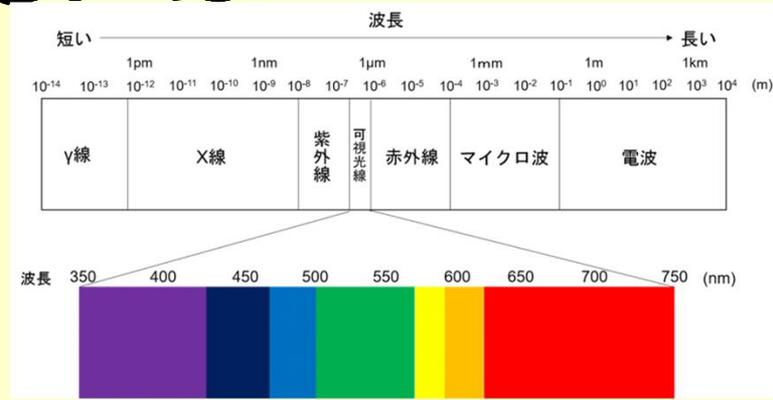
Gaia DR2 (2回目のデータ) : 2018年4月  
Gaiaでみた天球の星



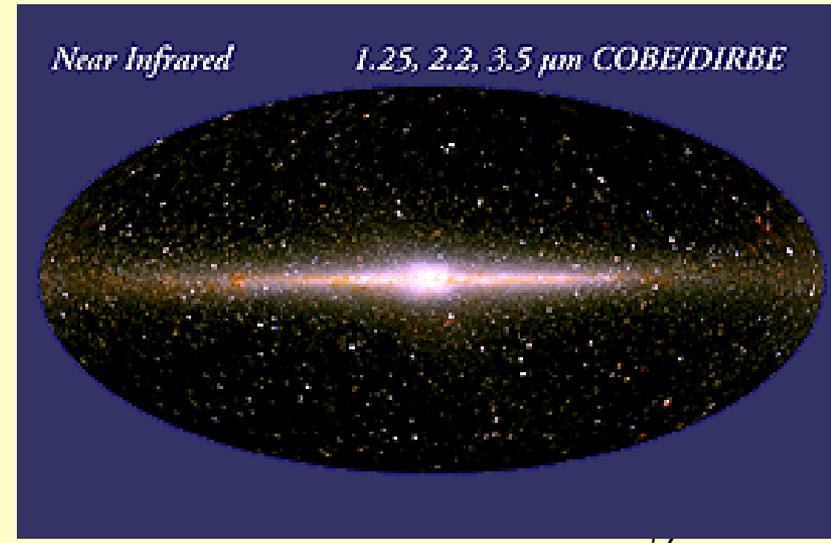
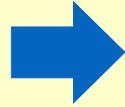
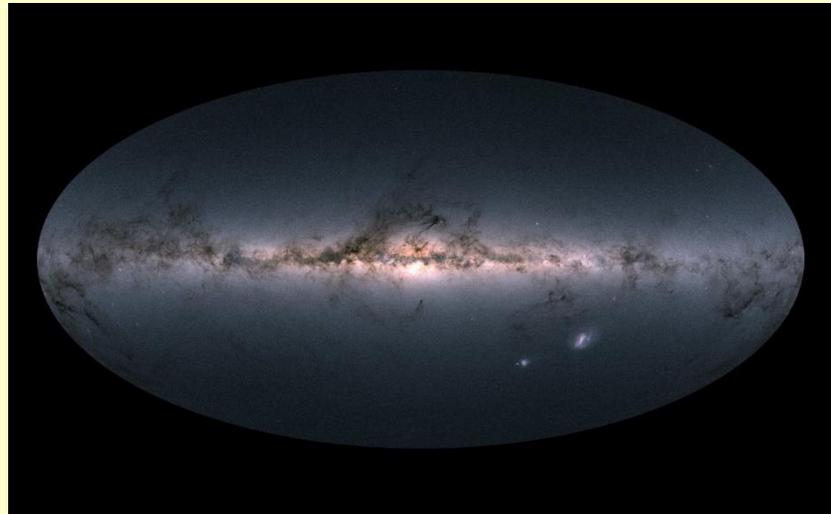
# 星自体の動きを測定するには 可視光(かしこう)から 近赤外線(きんせきがいせん) がちょうど良い

可視光による観測

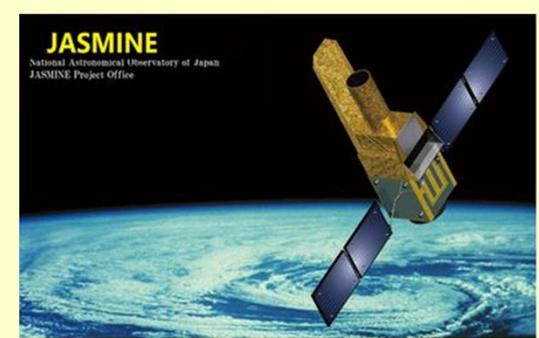
(塵に覆われて可視光では観測しにくい領域がある)



赤外線による観測例



# 4.赤外線位置天文観測衛星JASMINEによる 天の川銀河探究



# ***JASMINE***

***Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared EXploration***

**赤外線位置天文観測衛星計画** (けいかく)



**赤外線による観測**

**(波長(はちょう) : 1.0~1.6ミクロン)**

# JASMINEミッション



こうぼがた こがた けいかく  
◎JAXA宇宙科学研究所の公募型小型計画という  
カテゴリーの衛星計画(イプシロンロケットでの打ち上げ)  
での実現を目指している。



◎2019年5月、JAXA宇宙科学研究所  
により公募型小型3号機に選定された。



Credit: JAXA

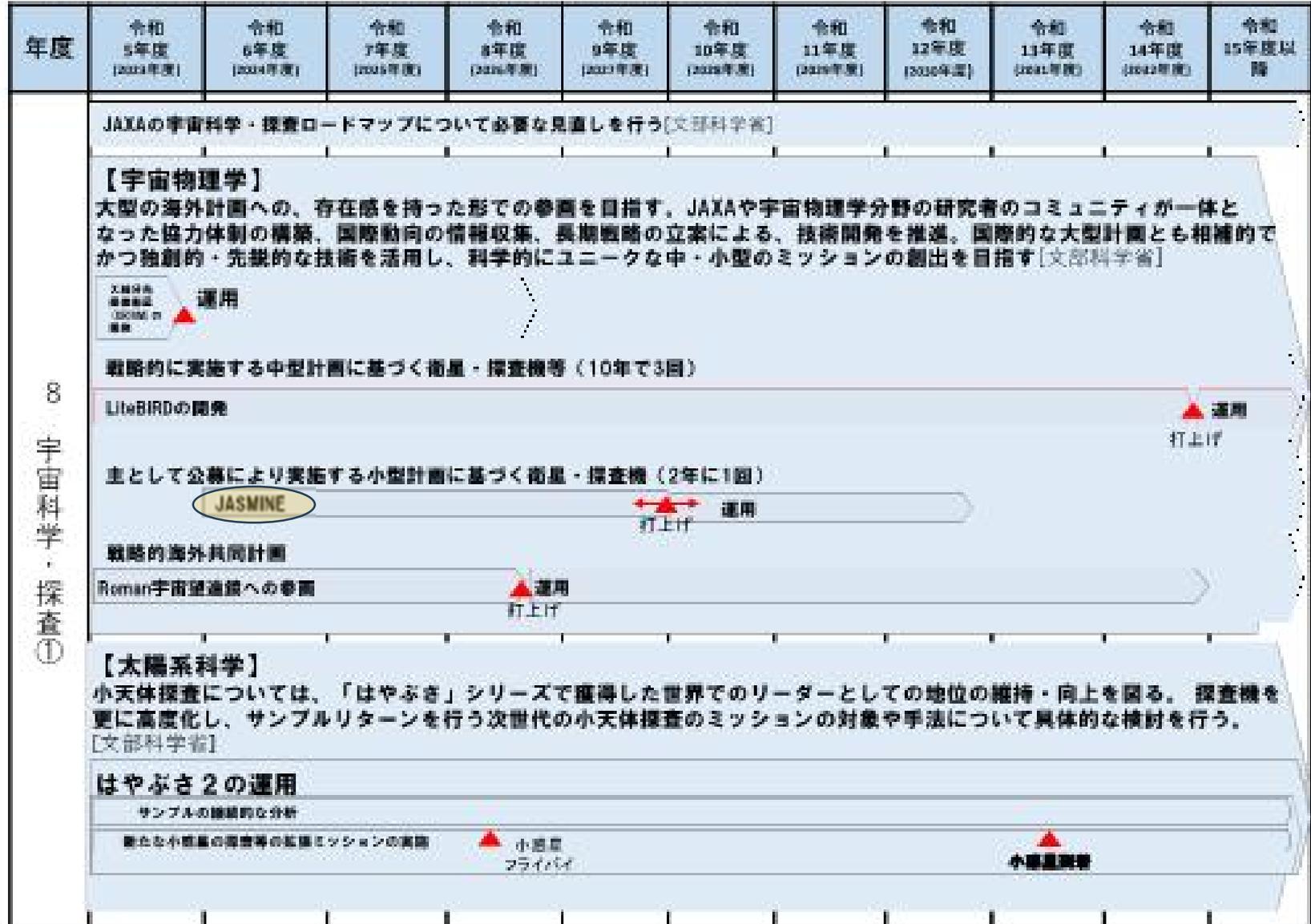
打ち上げ時期は、  
現在、内閣府で決定された  
宇宙基本計画工程表(2023年12月改訂)では  
2028年に位置付けられている。

イプシロンロケットでの打ち上げ(内之浦)

# 宇宙基本計画工程表(令和5年12月改定)より抜粋

うちゅう きほん けいかく こうてい ひょう 内閣府宇宙戦略開発本部(首相が本部長)が決定

## (3) 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造



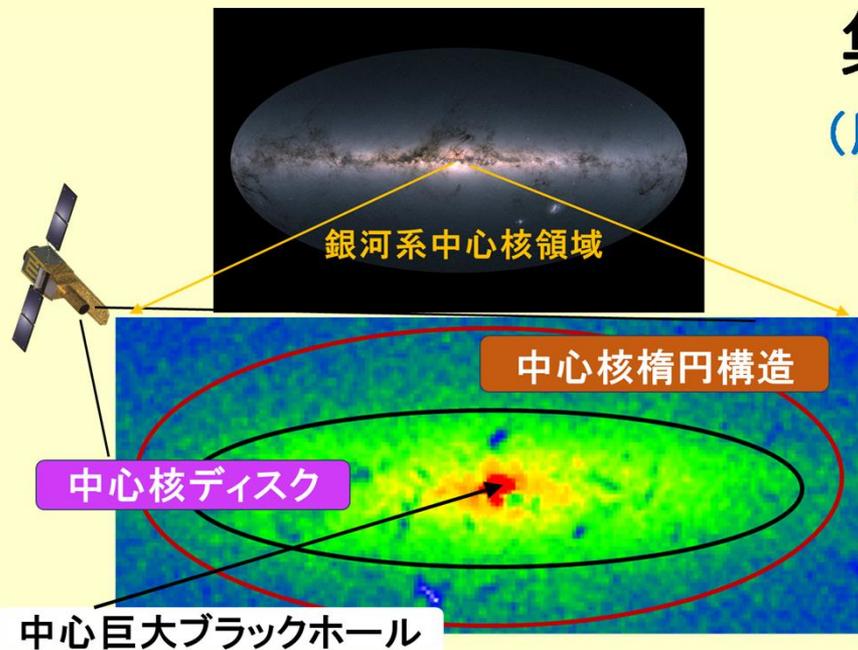
# JASMINE衛星！



0.000025秒角 (=1億4千万分の1度角  
=0.00000000069度角)クラスの精度！！

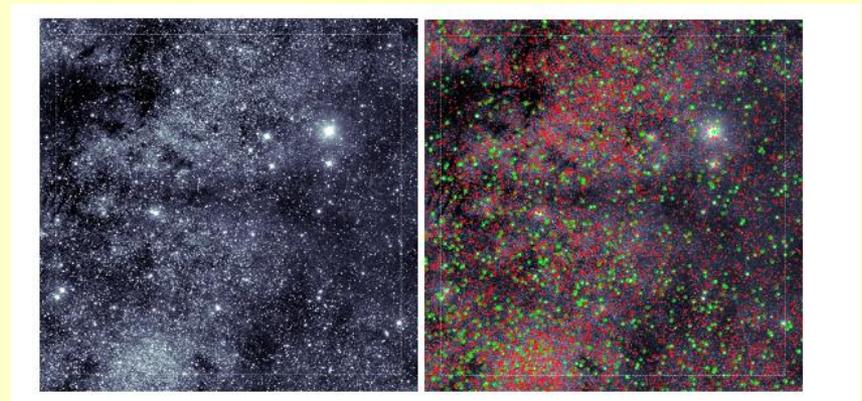
\* 100km離れた場所にいる人の髪の毛1本の太さの  
5分の1程度の大きさを見込む角度に相当

## 赤外線による観測

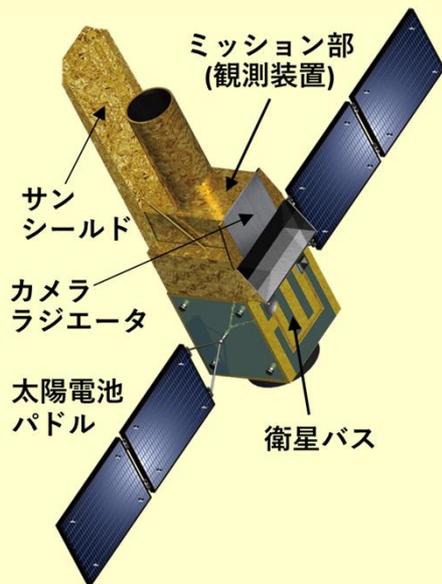


天の川銀河の中心部  
(中心核領域)を  
集中的に観測

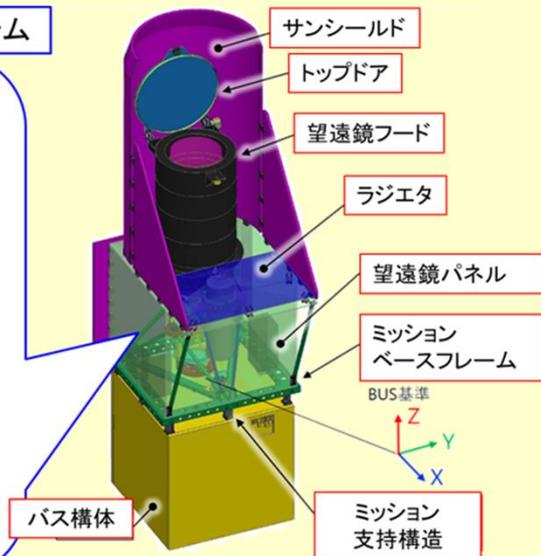
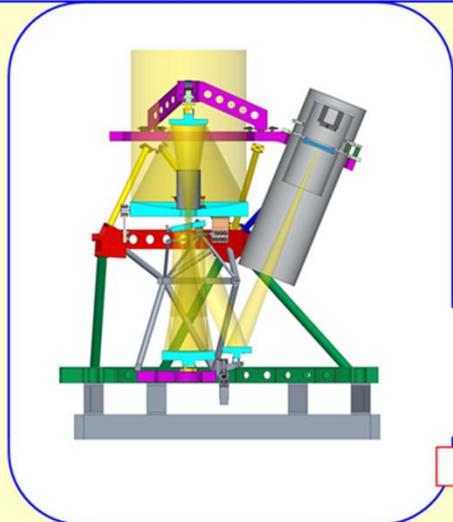
(塵(ちり)に覆(おお)われて可視光では  
観測しにくいところ)



# JASMINEはどんな観測装置なのか？



望遠鏡魔パネル内の望遠鏡システム



(MELCO提供)

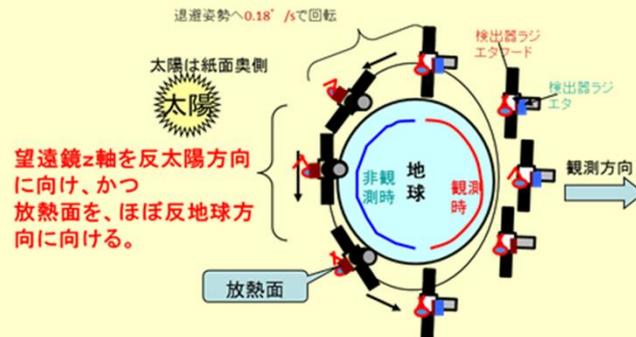
望遠鏡の鏡の直径(もっとも大きいもの)主口径:36cm程度



赤外線カメラ:地上での天文観測用に開発された高性能な国産カメラを宇宙でも使えるように開発中

たいよう どうききどう 昼と夜のさかいめ

軌道:太陽同期軌道(高さ約600km)  
観測期間:3年間程度

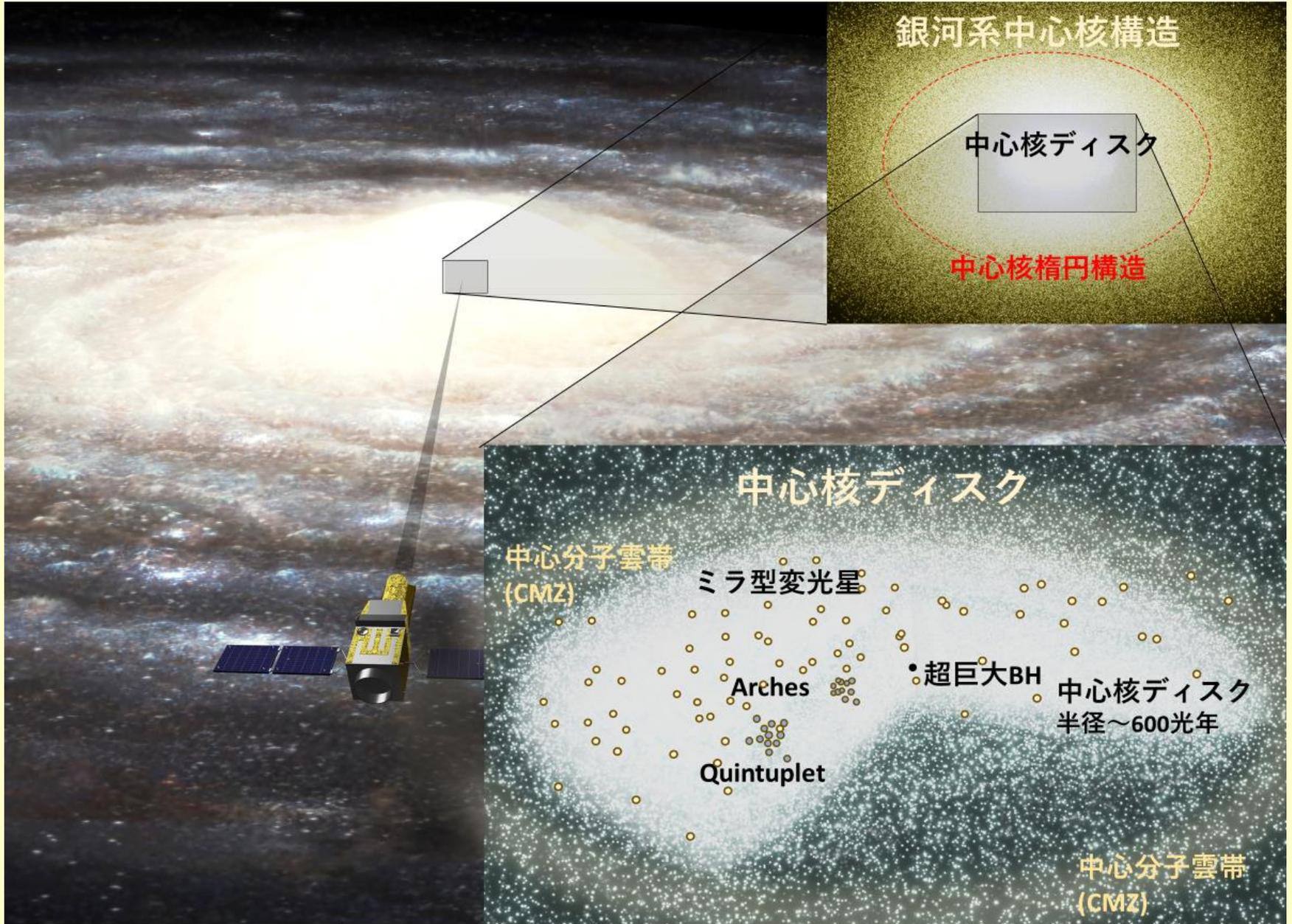


# ★JASMINEで解き明かす様々な謎

## 天の川銀河の中心核領域の星の距離と運動を観測



# 天の川銀河の中心核領域



# 何が分かるの？

## ★中心核ディスクの年齢

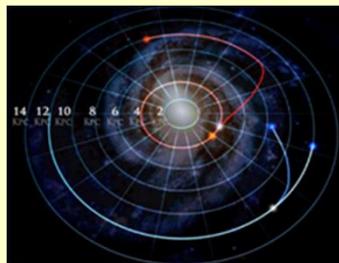


長い棒状構造の形成  
時期



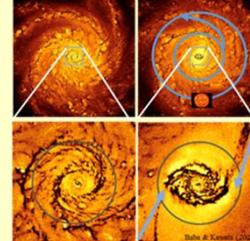
太陽系の移動解明

内部から外側に  
移動を開始 (!?)



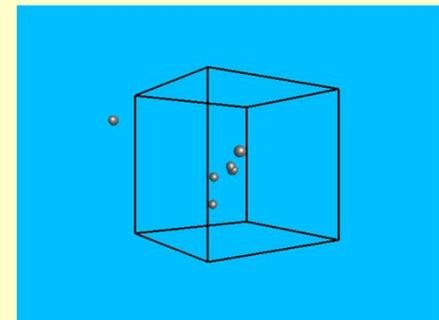
惑星形成  
に影響!?

気候変動?  
生命進化?  
人類誕生?



## ★100億年以上前の天の川銀河誕生時の様子

当時に形成された星々の  
運動の様子がそのまま残っているかも?

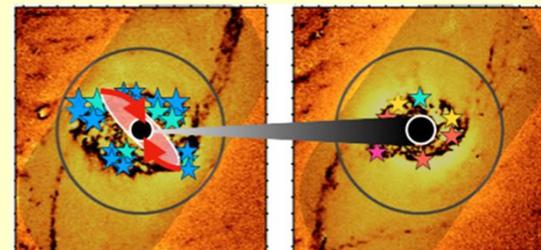


★むかしにいくつかの巨大ブラックホールが  
中心領域へ落ち込んできた  
名残(なごり)の発見(?)

★中心にある超巨大ブラックホール  
の重さが増えてきた理由が分かるかも



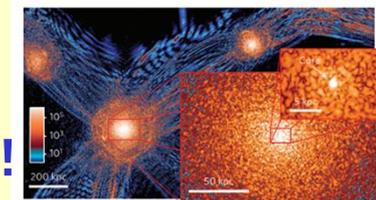
内部棒状  
構造の発見?!



★中心にあるブラックホール、  
ダークマターの探査



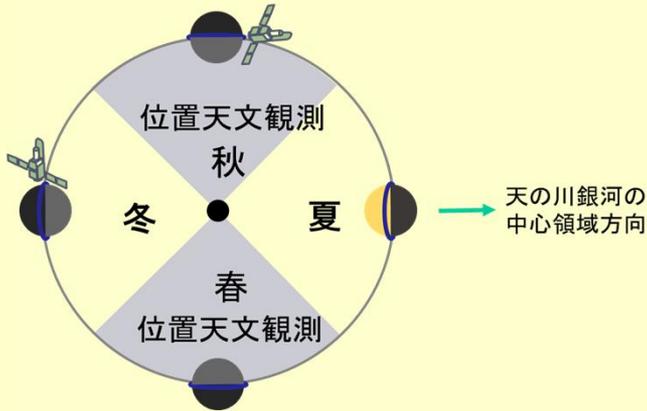
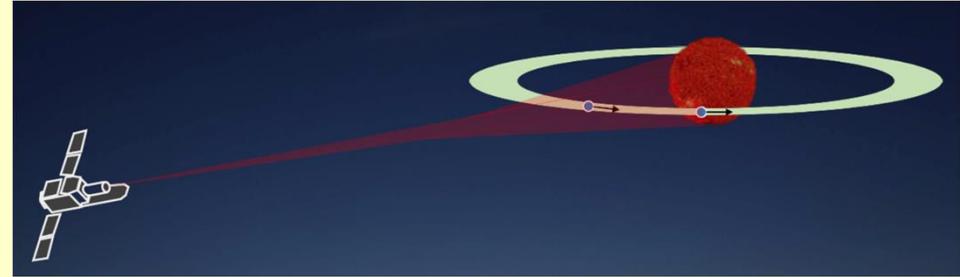
中間質量BHの発見?!  
ダークマターの正体解明?!



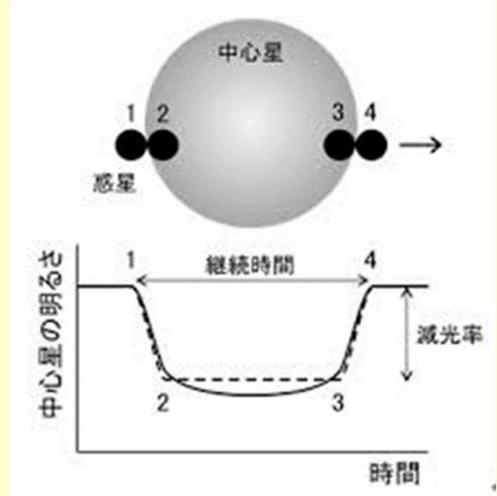
# 参考：JASMINEによって、生命が住んでいる可能性のある地球に似た惑星がみつかるかも！

春、秋：位置天文観測（天の川中心）

夏、冬：惑星探査（ターゲット星）



太陽より  
1/5程度小さく、  
温度が低くて赤い星が  
ターゲット



Credit:天文普及研究会



Credit:ESO

惑星が星の前をとおると、  
星の明るさが、ほんのすこし  
暗くなる  
→惑星を発見できる！！

今後・・・

たくさんの観測、

実験などの進展

そして、新しい宇宙像が  
見えてくるだろう

\* 天体現象の解明だけでは  
なく、物質や力の究極  
に関する研究の進展も  
期待できる。

JASMINEの観測データ  
=>世界の知的財産  
21世紀の銀河鉄道

ジャスミンへの応援も  
よろしくお願いします！！

皆さんに少しでも興味をもってもらえれば嬉しいです。

ありがとうございました

Jasmine

